МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Посвящается 100-летию гражданской авиации России
25-летию с начала сборки Международной космической станции
35-летию запуска космического корабля «Буран»

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Четвертая Международная научная конференция
4–21 апреля 2023 г.

Часть 1

Сборник докладов

Санкт-Петербург
2023

УДК 001.8
ББК 34.9
А99

А99 Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Четвертая Междунар. науч. конф. (СПб., 4–21 апреля 2023 г.): сб. докл.: в 2 ч. Ч. 1. – СПб.: ГУАП, 2023. – 320 с.
ISBN 978-5-8088-1818-7
ISBN 978-5-8088-1819-4 (Ч. 1)
DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1

В апреле 2023 года в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения состоится Четвертая Международная научная конференция «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», приуроченная ко Всемирному дню авиации и космонавтики. В работе секций принимают участие ведущие ученые и специалисты предприятий, преподаватели, научные сотрудники и аспиранты вузов как международного уровня, так и из различных регионов России.

Данный сборник докладов отражает основные направления научных исследований, проводимых как на кафедрах института аэрокосмических приборов и систем ГУАП, так и в других институтах и организациях. Представленные работы посвящены проблемам современного аэрокосмического приборостроения, аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, системного анализа, интеллектуальных транспортных систем и управления цепями поставок, вопросам эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, исследования систем навигации, стабилизации, а также проблемам разработки и внедрения аэрокосмических компьютерных и программных систем, систем передачи данных и программных комплексов, математическому и программному обеспечению вычислительных аэрокосмических систем и комплексов.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов, докторантов, магистрантов старших курсов технических университетов, руководителей компаний и международных специалистов.

УДК 001.8
ББК 34.9

Оргкомитет конференции

Председатель оргкомитета:
Антохина Ю. А., д-р экон. наук, профессор, ректор ГУАП

Сопредседатели оргкомитета:
Шишлаков В. Ф., д-р техн. наук, профессор
Майоров Н. Н., д-р техн. наук, доцент
Небылов А. В., д-р техн. наук, профессор
Овчинникова Н. А., канд. техн. наук, доцент
Скорина С. Ф., канд. техн. наук, доцент
Фетисов В. А., д-р техн. наук, профессор
Оленев В. Л., канд. техн. наук, доцент
Шехунова Н. А., канд. техн. наук, профессор
Суворова Е. А., канд. техн. наук, доцент

Члены оргкомитета:
Таратун В. Е., старший преп., канд. техн. наук
Рубинов В. В., аспирант
Добровольская А. А., ассистент
Костин А. С., ассистент
Низяева Ю. Д., лаборант
Таратун Е. А., ассистент

ISBN 978-5-8088-1818-7
ISBN 978-5-8088-1819-4 (Ч. 1)

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Уважаемые участники Четвертой Международной научной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии» в ГУАП!

Ежегодная Международная конференция в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения является актуальным событием в календаре специалистов авиационно-космической отрасли как Санкт-Петербурга, так и других городов мира. Международная конференция приурочена ко Всемирному дню авиации и космонавтики – 12 апреля.

Аэрокосмическая отрасль является одной из самых наукоемких сфер. Необходимо отметить, что вопросы беспилотных систем сегодня выходят на первое место в сфере исследований и разработок. В данной отрасли сегодня проводятся новые критические исследования, которые призваны ответить на современные запросы общества и индустрии. Для формирования успешных решений в данной области необходима серьезная проработка, начиная от математических моделей и построения новых конструкций беспилотных авиационных систем до выполнения исследовательских полетов и формирования пилотных проектов под конкретные задачи.

Однако для решения таких амбициозных задач необходимы квалифицированные кадры, подготовленные в университетской среде. Для решения поставленных задач уже сегодня необходима реализация элементов опережающей подготовки кадров, необходимо изменение учебных планов для включения новых, критически важных компетенций. Для реализации данной задачи в 2020 году в ГУАП была создана лаборатория беспилотных авиационных систем инженерной школы, лаборатория интеллектуальной транспортной инфраструктуры. С 2020 года по настоящее время выпускники ГУАП с новыми компетенциями внесли значительный вклад в развитие сферы беспилотных авиационных систем. Необходимо отметить, что программы подготовки бакалавров и магистров, усиленные специализированными лабораториями, позволяют сформировать у выпускника ГУАП знания крайне важные и востребованные как для настоящего времени, так и для задач развития индустрии беспилотных транспортных систем.

Наш университет обладает уникальным для мировой образовательной среды профилем «аэрокосмическое приборостроение», уникальными научными школами и исследовательскими аэрокосмическими центрами, он оказал значительное влияние на развитие аэрокосмической отрасли.

Международная конференция включает четыре секции, каждая из которых посвящена актуальным исследованиям в области аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, в области интеллектуальных транспортных систем, системного анализа и логистики, эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, и в области аэрокосмических компьютерных и программных систем. Исследования проводятся как на предприятиях, так и в Институте аэрокосмических приборов и систем ГУАП. В 2023 году к пленарному заседанию приглашены руководители приборостроительных компаний и научных центров Санкт-Петербурга, компании Государственной корпорации «Роскосмос», компании сферы разработок беспилотных авиационных систем, эксперты компетенций «Инженерия космических систем» и «Эксплуатация беспилотных авиационных систем» Агентства развития навыков и профессий.

Убеждена, что наша совместная работа будет способствовать решению поставленных задач по созданию условий для формирования лидерства, а также реализации долгосрочных программ развития высокотехнологичного аэрокосмического приборостроения.

Желаю всем участникам Международной конференции активной и плодотворной работы, внедрения новых идей и решений!

Ректор ГУАП,
доктор экономических наук, профессор
Ю. А. Антохина

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 681.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-5-10**

Б. Л. Бирюков*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ В АЛГОРИТМАХ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СИГНАЛОВ

Рассматриваются вероятностные характеристики случайных процессов, необходимые для построения алгоритмов адаптивного оценивания сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности в модели оцениваемого процесса. Находится численное решение для определяемых характеристик и производится его анализ.
Ключевые слова: *случайные процессы, вероятностные характеристики, параметрическая априорная неопределенность, численное решение.*

B. L. Biryukov*
Senior Lecturer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DETERMINING THE PROBABILITY CHARACTERISTICS OF PROCESSES IN THE ALGORITHMS OF ADAPTIVE SIGNAL ESTIMATION

Probability characteristics of stochastic processes necessary to make the algorithms of adaptive signal estimation under conditions of parametric a prior uncertainty in the model of estimated process are considered. Numerical decision for defined characteristics is found and its analysis is performed.
Keywords: *stochastic processes, probability characteristics, parametric a prior uncertainty, numerical decision.*

Необходимость оценивания сигналов в условиях, когда присутствует неопределенность относительно параметров как модели оцениваемых величин, так и модели наблюдаемых сигналов, заставляет использовать те или иные решения, направленные на преодоление этой априорной неопределенности, в частности применять методы адаптивного оценивания.

Существуют различные подходы к построению адаптивных систем оценивания в условиях параметрической априорной неопределенности. Известно [1, 2, 3], что при полной априорной определенности одним из наиболее эффективных подходов при обработке результатов измерений является применение алгоритмов оценивания на основе марковской теории фильтрации. Алгоритм работы фильтра в этом случае определяется системой дифференциальных уравнений, которые представляются обычно в векторно-матричном виде

$$\frac{\mathrm{d}\hat{x}(t)}{\mathrm{d}t} = F(t)\hat{x}(t) + K(t)[y(t) - C(t)\hat{x}(t)], \qquad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t) + \eta(t), \qquad (2)$$

где $F(t)$, $C(t)$ – известные матрицы; $K(t)$ – коэффициент усиления фильтра; $\hat{x}(t)$ – вектор оценки; $y(t)$ – наблюдаемый вектор; $\eta(t)$ – вектор белых гауссовских шумов измерений с матрицей интенсивностей $N\eta$. Существуют различные модификации алгоритма (1), (2), которые можно отнести к фильтрам калмановского типа. Уравнения (1), (2) описывают линейный фильтр, который является оптимальным в среднеквадра-

тическом смысле при условии, что оцениваемый вектор являются векторным марковским процессом, что изначально предполагается, т. е. модель оцениваемого вектора задается линейным векторным стохастическим дифференциальным уравнением

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = F(t)x(t) + \xi(t), \qquad (3)$$

где $\eta(t)$ – вектор белых гауссовских шумов с матрицей интенсивностей N_ξ.

При наличии априорной неопределенности относительно параметров в моделях измерений (2) и оцениваемого процесса (3) необходимо переходить к соответствующим алгоритмам адаптивных фильтров. Один из таких алгоритмов, основывается на включении априорно неизвестных параметров моделей входных процессов β состав оцениваемого вектора с получением расширенного вектора параметров $x_\mathrm{p} = (x,\beta)^\mathrm{T}$. Если изменение параметров β, характеризующих априорную неопределенность, можно описать дифференциальными уравнениями, то расширенный вектор сохранит свойство марковости и для его оценивания можно опять применить алгоритм марковской фильтрации. Однако линейный фильтр (1), (2) теперь неприменим, поскольку уравнения, описывающие расширенный оцениваемый вектор x_p становятся нелинейными. В таких условиях необходимо применять алгоритмы марковского нелинейного оценивания.

Рассмотрим распространенную на практике задачу оценивания гауссовско-марковского экспоненциально коррелированного процесса, задающегося стохастическим дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = -\alpha x(t) + \alpha\mu\xi(t), \qquad (4)$$

где α – параметр, обратный интервалу корреляции процесса (определяет ширину спектра процесса); $\xi(t)$ – нормально распределенный белый шум, имеющий интенсивность N_ξ; μ – коэффициент передачи по шуму $\xi(t)$.

Модель наблюдения является аддитивной и определяется выражением

$$y(t) = x(t) + \eta(t), \qquad (5)$$

где шум измерений $\eta(t)$ также является белым гауссовским с интенсивностью $N\eta$.

Предполагается, что интенсивности шумов N_ξ, $N\eta$ являются известными также как и параметр α, а не известен параметр μ, что создает априорную неопределенность в модели оцениваемого процесса $x(t)$ в виде неизвестной его дисперсии. Поэтому расширенный оцениваемый вектор должен состоять из двух компонент: $x_\mathrm{p} = (x, \mu)^\mathrm{T}$.

Алгоритм марковского нелинейного оценивания включает в себя три процедуры. Первая процедура состоит в определении экстраполированной плотности вероятности оцениваемого процесса, вторая – в нахождении функционала (или функции) правдоподобия исходя из модели наблюдения и третья – в получении апостериорной плотности вероятности на основе первых двух функций. Применительно к рассматриваемой задаче нелинейность присутствует в модели оцениваемого вектора, в то время как функция правдоподобия является гауссовской, благодаря линейности (5) и гауссовости шума измерений $\eta(t)$. Поэтому работоспособность алгоритма нелинейного оценивания будет определяться тем, насколько правильно находится экстраполированная плотность вероятности оцениваемого вектора.

Экстраполированная плотность вероятности может быть определена [1] как решение уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова:

$$\frac{\partial p(x_\mathrm{p},t)}{\partial t} = \mathrm{L}\{p(x_\mathrm{p},t)\}, \qquad (6)$$

где L{} – прямой дифференциальный оператор для диффузионного процесса:

$$\mathrm{L}\{p(x_\mathrm{p},t)\} = -\frac{\partial^\mathrm{T}}{\partial x_\mathrm{p}}[a(t,x_\mathrm{p})p(x_\mathrm{p},t)] + \\ + \frac{1}{2}\mathrm{tr}\left\{\frac{\partial}{\partial x_\mathrm{p}}\frac{\partial^\mathrm{T}}{\partial x_\mathrm{p}}[b(t,x_\mathrm{p})p(x_\mathrm{p},t)]\right\}, \qquad (7)$$

где функции $a(t,x_\mathrm{p}),b(t,x_\mathrm{p})$ – соответственно коэффициенты сноса и диффузии; tr – оператор следа матрицы; $\frac{\partial}{\partial x_\mathrm{p}}$ – оператор дифференцирования по векторному аргументу. Непосредственно к уравнению (6) добавляются начальные и граничные условия:

$$p(x_\mathrm{p},t)\Big|_{t=t_0} = p(x_\mathrm{p},t_0), \lim_{x_\mathrm{p}\to\pm\infty} p(x_\mathrm{p},t) = 0.$$

Коэффициенты $a(t,x_\mathrm{p}),b(t,x_\mathrm{p})$ определяются из стохастического дифференциального уравнения исследуемого процесса $x_\mathrm{p} = (x, \mu)^\mathrm{T}$, в скалярной записи имеющего вид:

$$\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} = -\alpha x(t) + \alpha[\mu_0 + \mu_1]\xi(t), \\ \frac{\mathrm{d}\mu_1}{\mathrm{d}t} = 0, \mu = \mu_0 + \mu_1, \mathrm{M}\{\mu_1\} = 0. \qquad (8)$$

где неизвестный параметр μ разделен на две составляющие: μ_0 – среднее значение параметра μ; μ_1 – центрированная составляющая.

Так как вектор x_p имеет размерность $n = 2$, то коэффициенты $a(t,x_p),b(t,x_p)$ представляют собой соответственно вектор-функцию и матрицу-функцию:

$$a(t,x_p)=\begin{bmatrix} a_1(t,x_p) \\ a_2(t,x_p) \end{bmatrix}, b(t,x_p)=\begin{bmatrix} b_{11}(t,x_p) & b_{12}(t,x_p) \\ b_{12}(t,x_p) & b_{22}(t,x_p) \end{bmatrix}.$$

Из-за того, что в (8) правая часть уравнения для μ_1 равна нулю (считается, что μ_1 – гауссовская случайная величина с дисперсией σ_μ^2), ненулевой будет только функция

$$a_1(t,x_p) = a_1(t,x,\mu_1) = -\alpha x.$$

Поскольку формирующий шум входит только в первое уравнение, то ненулевым в матрице диффузии является только элемент

$$b_{11}(t,x_p) = [\alpha(\mu_0 + \mu_1)]^2.$$

Решение уравнения (6) было получено численно с использованием сеточных методов. Исходные данные для моделирования: $\alpha = 0{,}04$ 1/с; $N_\xi = 1$; $\mu_0 = 3$; $\sigma_{x0} = 0{,}5$ (σ_{x0}^2 – дисперсия начального значения); $\sigma_\mu = 0{,}5$; интервал времени между решениями – 6 с. Результаты моделирования представлены на рис. 1–18. На трехмерных графиках ось абсцисс в горизонтальной плоскости соответствует параметру *x*, ось ординат – параметру μ_1. Вертикальная ось соответствует экстраполированной плотности вероят-

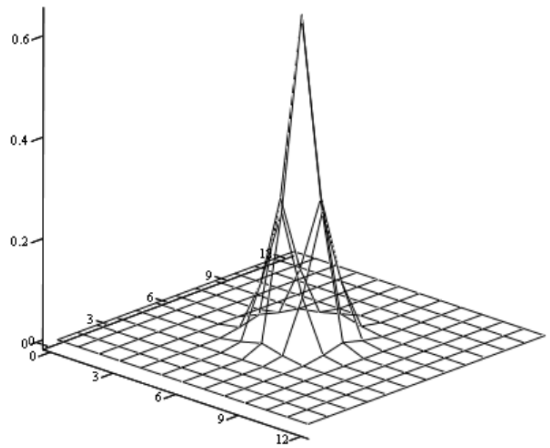


Рис. 1. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в начальный момент времени t_0

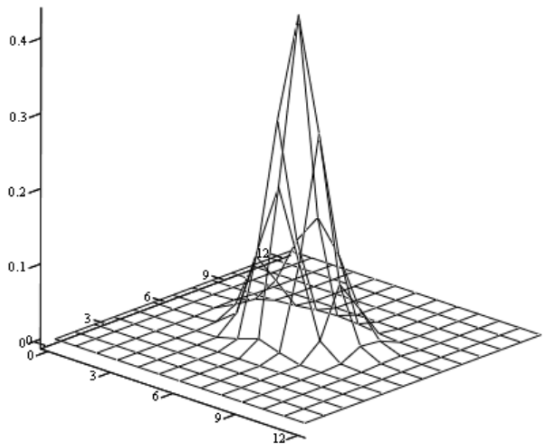


Рис. 2. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_1 = 6$ с

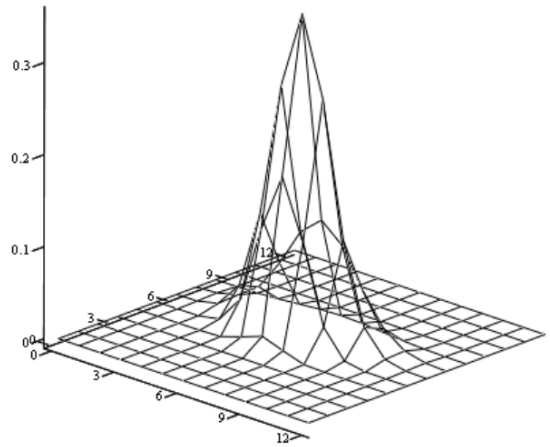


Рис. 3. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_2 = 12$ с

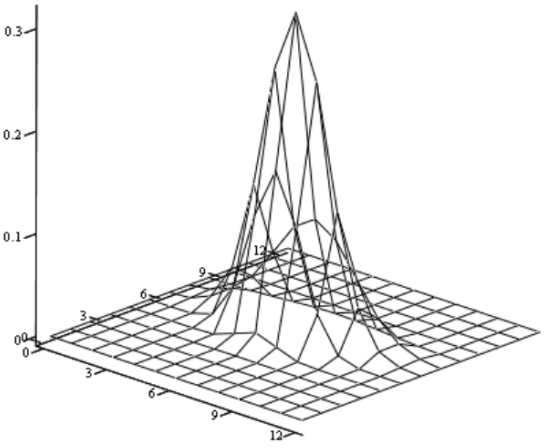


Рис. 4. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_3 = 18$ с

ности $p(x,\mu_1,t)$. На графиках показаны 4 последовательных сечения по времени; первое сечение – начальное распределение. Для рис. 1–9 начальное распределение вектора (x, μ_1) является совместно гауссовским с нулевым математическим ожиданием при нулевой взаимной корреляции между x и μ_1, а для рис. 10–18 – с нормированным ковариационным моментом между x и μ_1 в начальный момент, равным 0,75.

Из графических зависимостей следует, что плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ по форме отличается от гауссовской. Взаимный ковариационный момент между параметрами x и μ_1 с ростом времени уменьшается (держится на околонулевом уровне, если сразу был равен нулю при $t = 0$). Однако сохраняется взаимная зависимость параметров x и μ_1 с ростом t независимо от параметров начального распределения (рис. 9, 18).

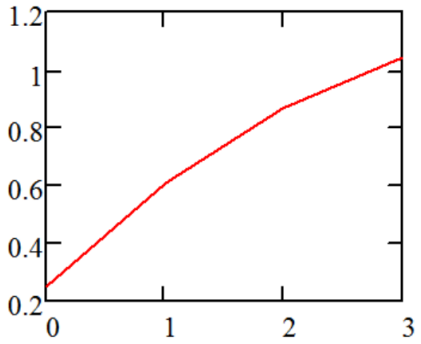


Рис. 5. Дисперсия параметра x для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

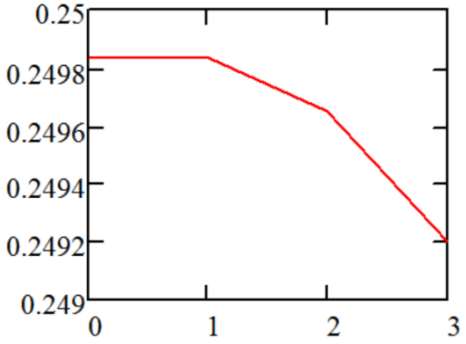


Рис. 6. Дисперсия параметра μ_1 для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

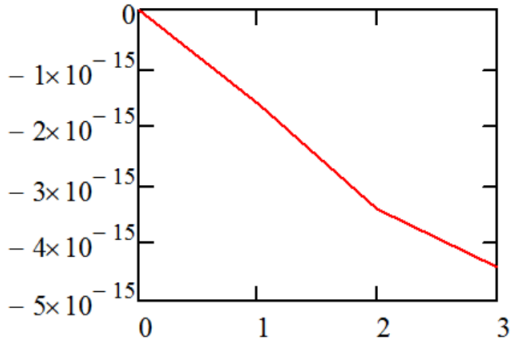


Рис. 7. Ковариационный момент параметров x и μ_1 для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

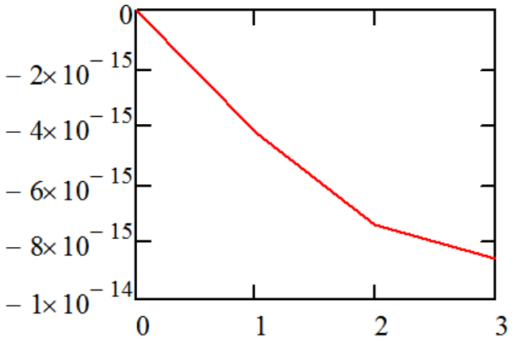


Рис. 8. Нормированный ковариационный момент параметров x и μ_1 для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

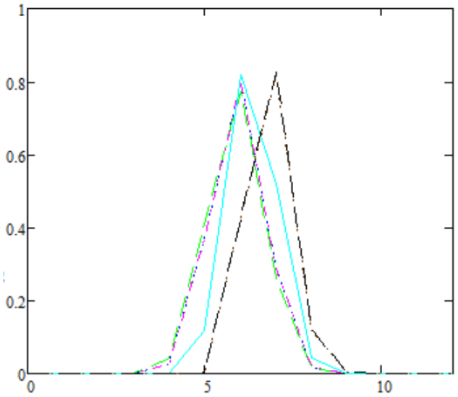


Рис. 9. Условная плотность вероятности $p(\mu_1|x)$ для разных значений x в момент времени t_3

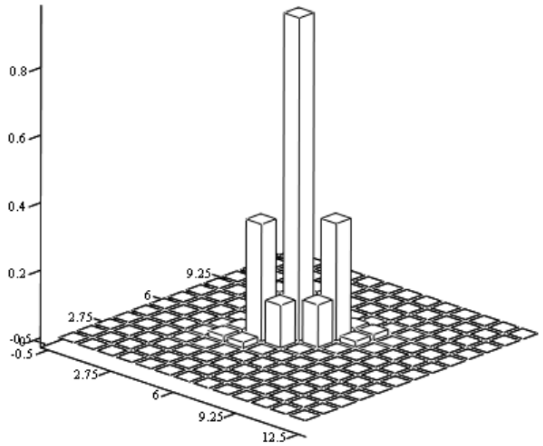


Рис. 10. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в начальный момент времени t_0

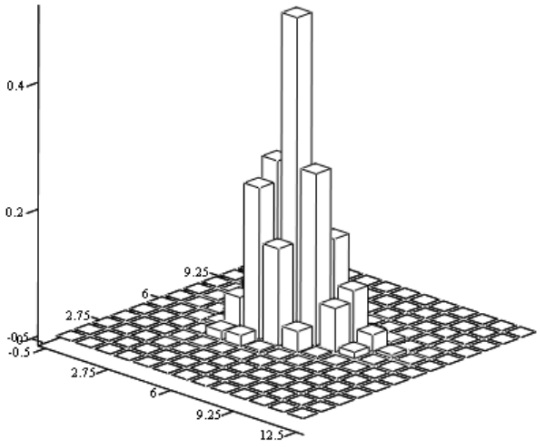


Рис. 11. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_1 = 6$ с

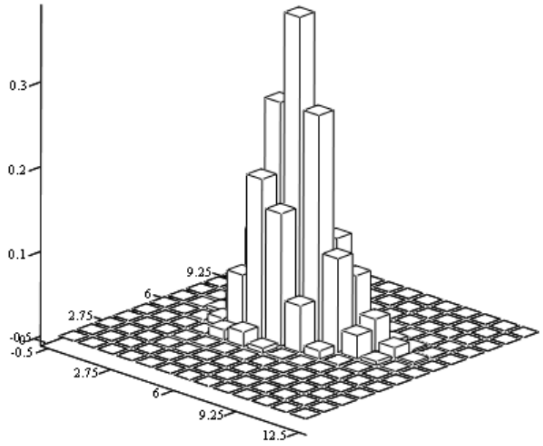


Рис. 12. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_2 = 12$ с

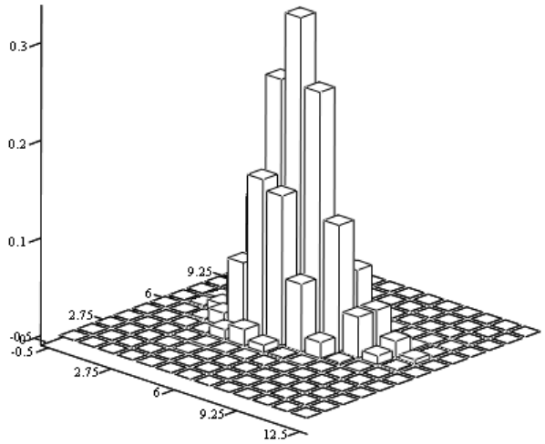


Рис. 13. Плотность вероятности $p(x,\mu_1,t)$ в момент времени $t_3 = 18$ с

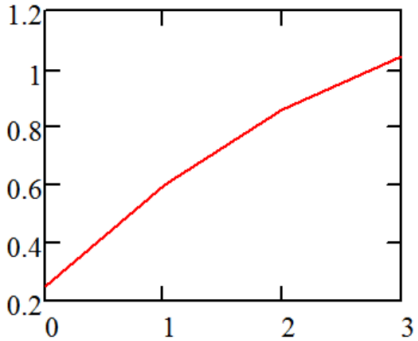


Рис. 14. Дисперсия параметра x для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

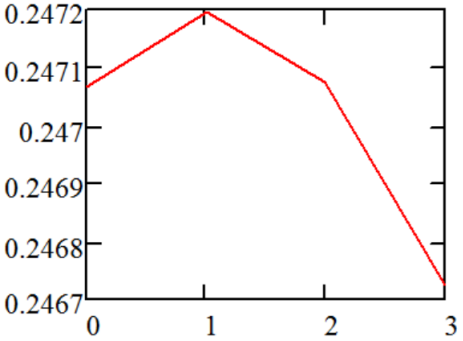


Рис. 15. Дисперсия параметра μ_1 для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3

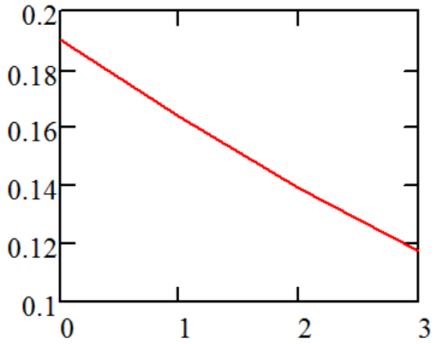


Рис. 16. Ковариационный момент параметров x и μ_1 *для моментов времени* t_0, t_1, t_2, t_3

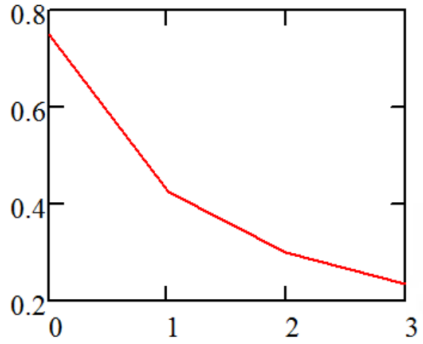


Рис. 17. Нормированный ковариационный момент параметров x и μ_1 *для моментов времени* t_0, t_1, t_2, t_3

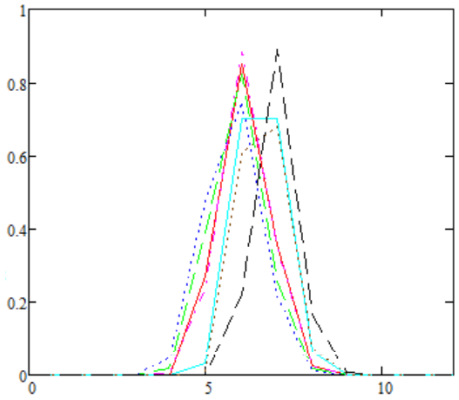


Рис. 18. Условная плотность вероятности $p(\mu_1|x)$ *для разных значений x в момент времени* t_3

Таким образом, негауссовость экстраполированной плотности вероятности для рассматриваемой задачи может существенно повлиять на работоспособность алгоритмов адаптивного оценивания на основе расширенного вектора, если в них применяется гауссовская аппроксимация апостериорной плотности вероятности.

Библиографический список

1. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.

2. *Степанов О. А.* Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 196 с.

3. *Шахтарин Б. И.* Фильтры Винера и Калмана. М.: Гелиос АРВ, 2008. 408 с.

УДК 681.5:629.7

Б. Л. Бирюков*
старший преподаватель
А. В. Сорокина*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРОВЕРКОЙ КАЧЕСТВА НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ

Рассматривается задача фильтрации сигналов в комплексной системе измерения навигационных параметров движения летательного аппарата в вертикальной плоскости в условиях априорной неопределенности относительно вероятностных характеристик погрешностей измерителей. В алгоритме оценивания используются средства проверки точности настройки параметров адаптивного фильтра. Выполнено компьютерное моделирование алгоритма и анализ результатов.
Ключевые слова: *фильтрация сигналов, комплексные измерительные системы, априорная неопределенность, адаптивные фильтры, компьютерное моделирование.*

B. L. Biryukov*
Senior Lecturer
A. V. Sorokina*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ADAPTIVE FILTERING OF AIRCRAFT NAVIGATION PARAMETERS WITH QUALITY CONTROL OF THE EVALUATION ALGORITHM SETTINGS

The problem of filtering signals in a complex system for measuring the navigation parameters of the aircraft movement in a vertical plane under conditions of a priori uncertainty about the probabilistic characteristics of measurement errors is considered. The estimation algorithm uses means to check the accuracy of the adaptive filter parameters settings. Computer simulation of the algorithm and analysis of the results were performed.
Keywords: *signal filtering, complex measurement systems, a priori uncertainty, adaptive filters, computer simulation.*

При решении задач оценивания сигналов в навигационных комплексах летательных аппаратов наибольшее распространение получило [1] использование фильтра Калмана в модификации, соответствующей условиям задачи. Это объясняется тем, что фильтр Калмана позволяет получать оптимальные по среднеквадратическому критерию оценки параметров, причем входные процессы при этом должны быть марковскими. Строгая оптимальность фильтра гарантируется лишь для гауссовско-марковских входных процессов.

Фильтр Калмана также позволяет обеспечивать оптимальность оценки в нестационарных режимах. Вместе с тем, если характеристики входных процессов известны не полностью, то возникают трудности с синтезом фильтра Калмана. Для преодоления априорной неопределенности с последующим применением модифицированного фильтра Калмана необходимо предусмотреть специальные элементы, предназначенные для восстановления недостающей информации о входных процессах и включения их в общий алгоритм оценивания.

Рассмотрим задачу синтеза комплексной системы измерения параметров движения летательного аппарата в вертикальной плоскости. Вектор оцениваемых параметров состоит из трех компонент: высота полета, вертикальная скорость и низкочастотная составляющая погрешности позиционного датчика высоты. Модель оцениваемого вектора определяется системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dh}{dt} = v_y(t),$$

$$\frac{dv_y(t)}{dt} = f_1(y_1(t), \xi_1(t)),$$

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = f_2(\eta(t), \xi_2(t)),$$

где h, v_y – высота и вертикальная скорость полета соответственно; f_1 и f_2 – заданные функции, определяющие динамику оцениваемого вектора; y_1 и y_2 – наблюдаемые сигналы для первого и второго измерителей; η – низкочастотная составляющая погрешности второго измерителя; ξ_1 – широкополосная составляющая погрешности первого измерителя, считающаяся белым шумом; ξ_2 – формирующий белый шум для низкочастотной составляющей погрешности второго измерителя.

Модель наблюдаемых сигналов измерителей имеет вид:

$$y_1(t) = a_y(t) + \xi_1(t),$$

$$y_2(t) = h(t) + \eta(t) + \xi_0,$$

где ξ_0 – широкополосная составляющая погрешности второго измерителя.

На основании общих уравнений фильтра Калмана [2], можно записать выражение для оценки вектора параметров, представленное в векторно-матричном виде:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A(t)\hat{x}(t) + K(t)[y(t) - H(t)\hat{x}(t)],$$

где матричный коэффициент усиления фильтра определяется по формуле:

$$K(t) = R(t)H^T(t)N_0^{-1}(t),$$

а апостериорная ковариационная матрица $R(t)$ удовлетворяет матричному уравнению Риккати:

$$\frac{dR(t)}{dt} = N_x(t) + A(t)R(t) + R(t)A^T(t) - \\ -R(t)H^T(t)N_0^{-1}(t)H(t)R(t).$$

Предполагается, что интенсивность широкополосной составляющей погрешности первого измерителя имеет априорную неопределенность в заданном диапазоне значений.

Для устранения рассогласования между параметрами фильтра и их оптимальными значениями для априорно известной интенсивности шума предусматривается введение в алгоритм оценивания сигналов регулировки параметров, обеспечивающих близкий к оптимальному режим работы алгоритма оценивания после окончания процесса настройки системы.

Из теории оптимальной фильтрации известно [2], что при оптимальных параметрах фильтра по статистическим характеристикам невязка [2, 3] фильтра Калмана, или порождающий процесс представляет собой некоррелированный по времени процесс типа белый шум.

При отклонении параметров фильтра от оптимальных значений сигнал невязки фильтра должен становиться коррелированным по времени.

Таким образом, степень отклонения ковариационной (корреляционной) функции невязки от дельта-функции может характеризовать степень отклонения параметров фильтра от оптимальных значений.

В статье рассматривается вариант адаптивного фильтра Калмана, приспосабливающегося к интенсивности широкополосной составляющей погрешности измерений, а для проверки качества процесса адаптации и определения его завершенности производится оценивание корреляционных свойств сигнала невязки.

Схема адаптивного фильтра соответствует, в целом, структуре фильтра Калмана [4] и приведена на рис. 1.

Из рисунка следует, что адаптивный фильтр имеет общую структуру, свойственную фильтрам калмановского типа. Отличие от стандартной схемы фильтра заключается в наличии блока адаптации БА и блока проверки БП.

В блоке адаптации производится оценивание неизвестных характеристик входных процессов по наблюдаемому сигналу и дальнейшая подстройка параметров матричного коэффициента усиления фильтра согласно требованиям оптимального оценивания.

В блоке проверки производится текущее оценивание корреляционных свойств порождающего процесса, на основании которых определяется точность процесса адаптации и осуществляется управление процессом адаптации.

Применительно к рассматриваемой задаче, в блоке адаптации при помощи вспомогательного

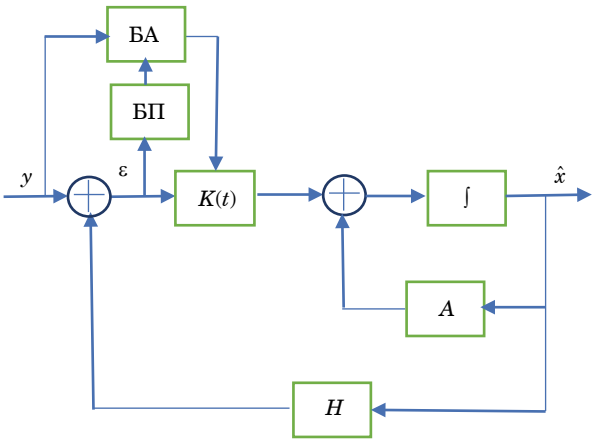


Рис. 1. Схема адаптивного фильтра

фильтра производится оценивание неизвестной интенсивности широкополосного шума первого измерителя с последующим учетом полученного значения в основном фильтре.

В блоке проверки осуществляется определение выборочной ковариационной функции сигнала невязки и выполняется сравнение ее с дельтаобразной функцией. По результатам сравнения проводится управление работы блока адаптации.

Результаты моделирования представлены на рис. 2–11. На рис. 2–4 приведено изменение коэффициентов усиления фильтра по трем оцениваемым компонентам в неадаптивном режиме. На рис. 5 показан процесс оценивания низкочастотной составляющей погрешности второго измерителя.

На рис. 6–9 представлены аналогичные характеристики, но для адаптивного режима работы фильтра.

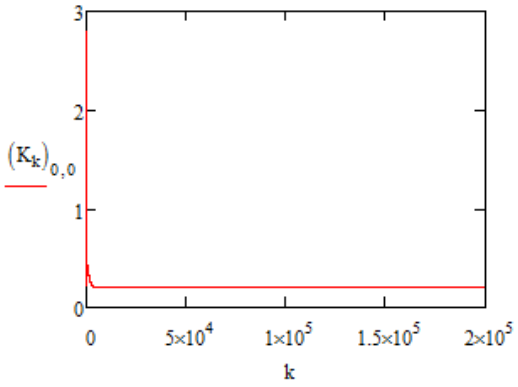


Рис. 2. Коэффициент усиления фильтра для первой компоненты оцениваемого вектора

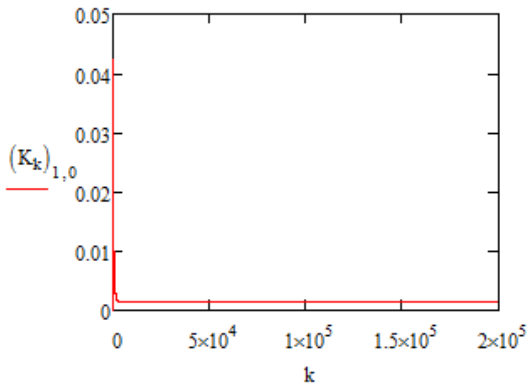


Рис. 3. Коэффициент усиления фильтра для второй компоненты оцениваемого вектора

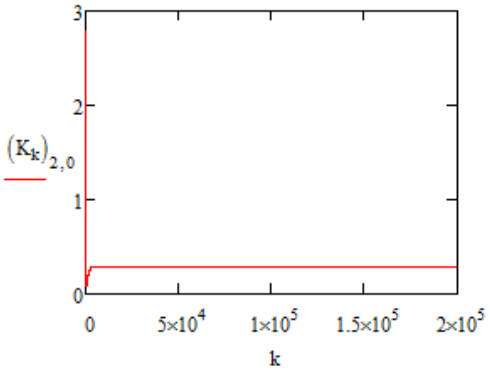


Рис. 4. Коэффициент усиления фильтра для третьей компоненты оцениваемого вектора

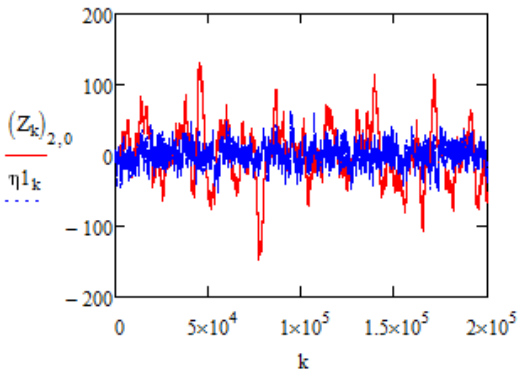


Рис. 5. Низкочастотная составляющая погрешности второго измерителя и ее оценка

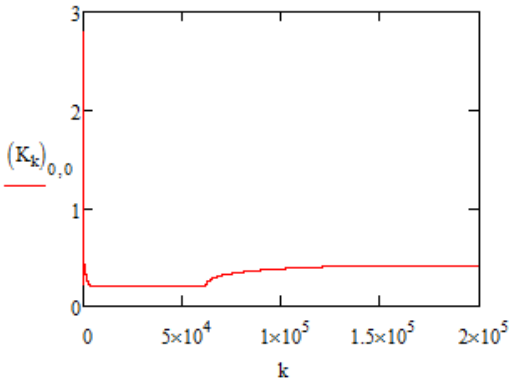


Рис. 6. Коэффициент усиления фильтра для первой компоненты оцениваемого вектора

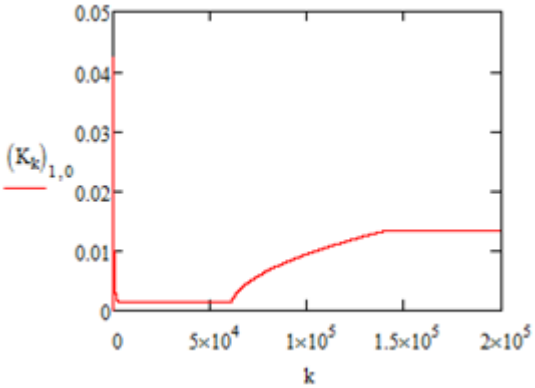


Рис. 7. Коэффициент усиления фильтра для второй компоненты оцениваемого вектора

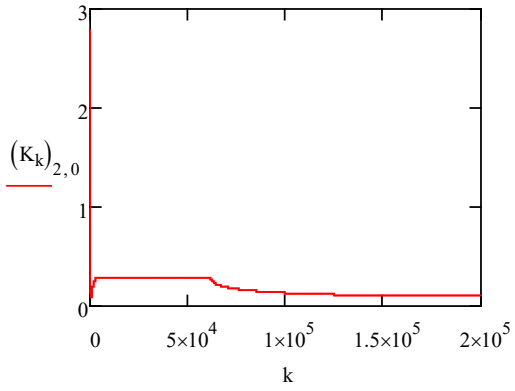


Рис. 8. Коэффициент усиления фильтра для третьей компоненты оцениваемого вектора

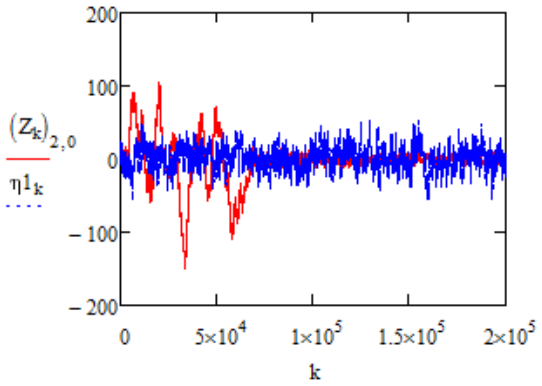
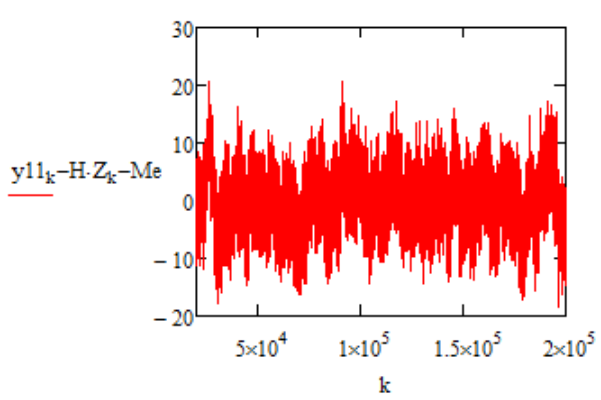
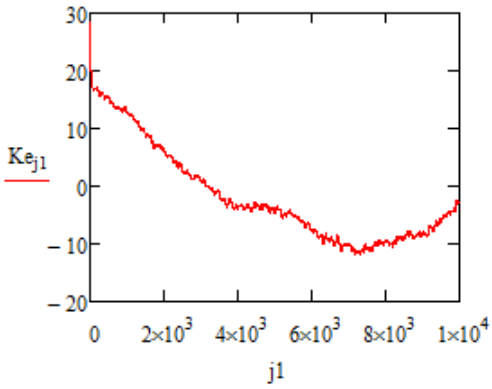
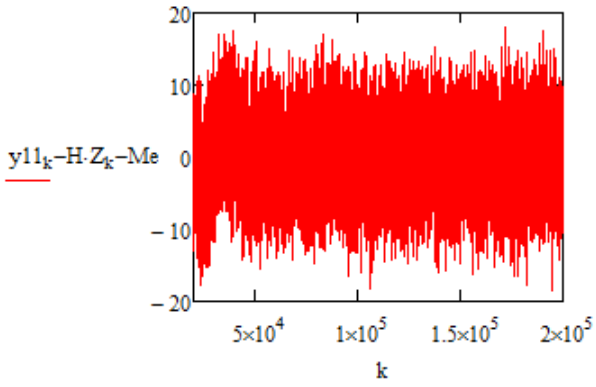


Рис. 9. Низкочастотная составляющая погрешности второго измерителя и ее оценка







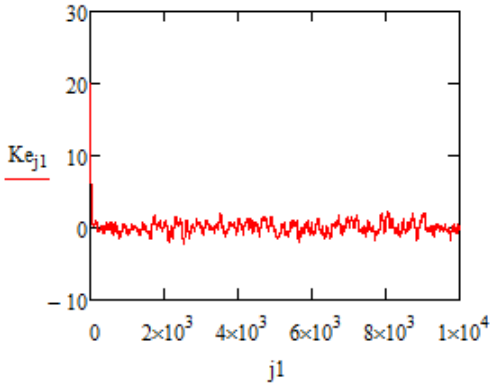


Рис. 10. Невязка фильтра и ее выборочная ковариационная функция в неадаптивном режиме работы

На рис. 10 представлены невязка фильтра и ее выборочная ковариационная функция для неадаптивного режима работы, а на рис. 11 – для адаптивного.

Из рис. 6–9 следует, что при изменении интенсивности широкополосного шума первого измерителя происходит перестройка коэффициентов усиления фильтра по всем трем компонентам. Переходный процесс успевает закончиться в пределах интервала наблюдения.

Сравнивая реализации процессов на рис. 5 и 9, можно увидеть, что в адаптивном режиме работы фильтра по мере перестройки фильтра ошибка оценки низкочастотной составляющей погрешности второго измерителя существенно уменьшается.

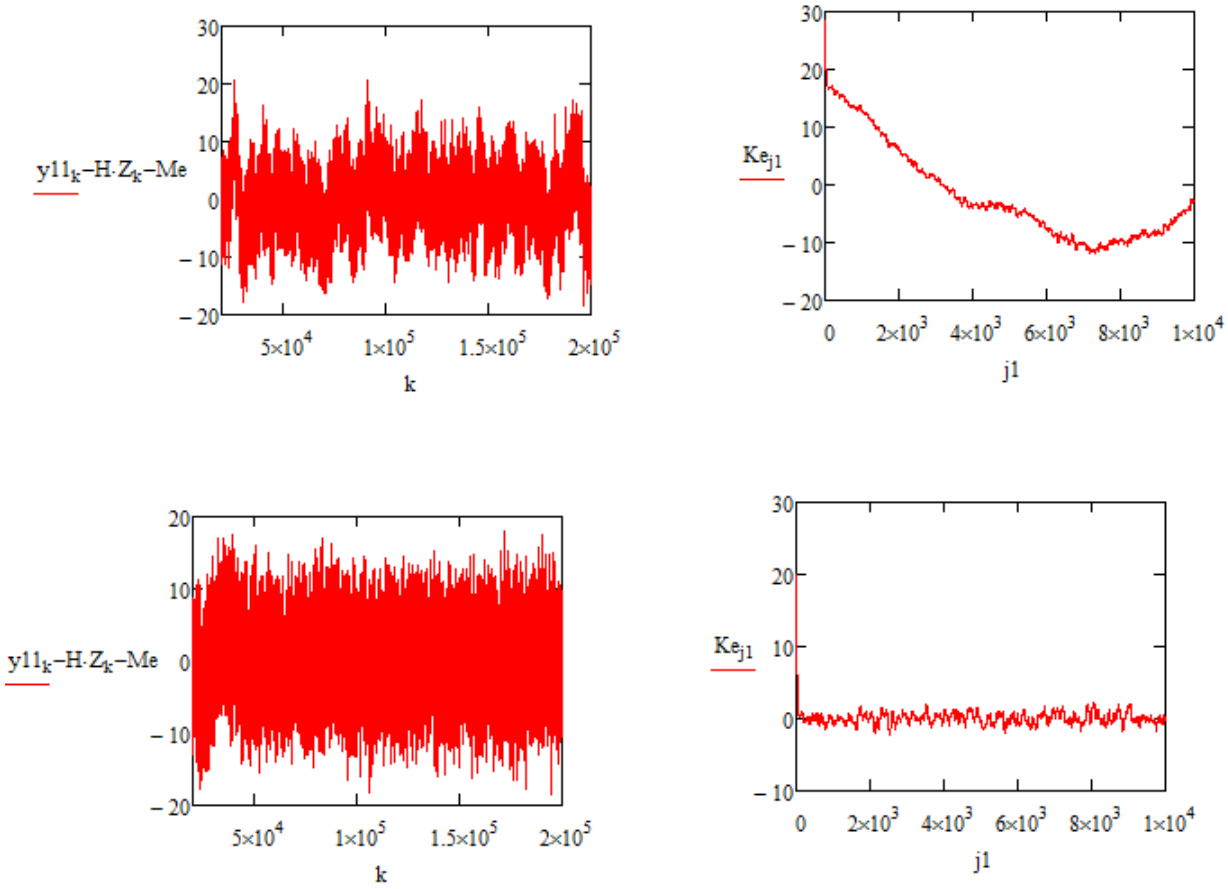


Рис. 11. Невязка фильтра и ее выборочная ковариационная функция в адаптивном режиме работы

Из рис. 10–11 видно, что после завершения процесса адаптации характеристики сигнала невязки существенно изменяются, а именно устраняется корреляция по времени и по своим свойствам невязка приближается к белому шуму.

Таким образом, вероятностные характеристики невязки фильтра (порождающего процесса) могут позволять достаточно надежно делать заключение о степени близости режима работы к оптимальному и управлять настройкой фильтра.

Библиографический список

1. *Бабич О. А.* Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1999. 436 с.

2. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.

3. Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов / Ю. П. Иванов, А. Н. Синяков, И. В. Филатов; под ред. В. А. Боднера. Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1984. 207 с.

4. *Степанов О. А.* Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 196 с.

УДК 351.814.33

В. И. Горних*
магистрант
А. Ю. Княжский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА АВИАЦИОННЫХ КОНФЛИКТОВ ЗА СЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ПЛАНОВЫХ 4D-ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ВО ВРЕМЕНИ

В статье предлагается метод оптимизации 4D-траектории группы конфликтующих воздушных судов. Данный метод можно применять к любым типам судов и на аэродромах со средним уровнем сложности движения. Предложенный алгоритм ориентирован на обнаружение возможной конфликтной ситуации, путем экстраполяции координат, с целью ее предупреждения и оптимизации траектории движения одного из воздушных судов.
Ключевые слова: *конфликтная ситуация, воздушное судно, траектория, оптимизация.*

V. I. Gornikh*
Postgraduate student
A. Yu. Knyazhsky*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REDUCING THE NUMBER OF AVIATION CONFLICTS DUE TO THE DISPLACEMENT OF PLANNED 4D TRAJECTORIES OF AIRCRAFT IN TIME

The article proposes a method for optimizing the 4D trajectory of a group of conflicting aircraft. This method can be applied to any types of vessels and at airfields with an average level of traffic complexity. The proposed algorithm is focused on detecting a possible conflict situation by extrapolating coordinates in order to prevent it and optimize the trajectory of one of the aircraft.
Keywords: *conflict situation, aircraft, trajectory, optimization*

Введение

Современное развитие авиатранспортной системы характеризуется постоянным увеличением интенсивности полетов, поэтому модернизация системы организации воздушного движения в первую очередь направлена на увеличение пропускной способности. Однако в условиях высокой плотности и динамичности воздушного движения увеличивается вероятность возникновения конфликтных ситуаций (КС) между воздушными судами (ВС). КС – это незапланированное опасное сближение воздушных судов, не предусмотренное планом полета, на расстояние менее половины установленного интервала, в результате которого возможно столкновение с другим ВС или материальным объектом. Откуда следует проблема, которая требует разработки методов по оптимизации траектории движения ВС при обнаружении конфликтной ситуации.

Статистика показывает: по данным ОрВД (организация воздушного движения) по итогам 2021 года в верхнем воздушном пространстве было обслужено 1,63 млн полетов, что на 26% больше, чем в 2020 году. Прошедший год характеризовался постепенным восстановлением объемов международных и транзитных перевозок, при этом количество международных полетов увеличилось на 30%, транзитных – на 16%. Общее количество обслуженных международных полетов составило 505 тыс., транзитных – 194 тыс.

В условиях такой высокой интенсивности любая задержка может вызвать цепную реакцию ошибок, в результате чего прилетающие

воздушные суда находятся в зонах ожидания в очереди на посадку, а вылетающие простаивают в очереди на земле. Это создает дополнительную нагрузку на пилотов и диспетчеров, вследствие чего ухудшаются показатели безопасности полетов.

Известные методы

На сегодняшний день известно большое количество методов, которые решают проблему по обнаружению конфликтных ситуаций и оптимизируют траектории воздушных судов:

1. Универсальный алгоритм разрешения конфликтных ситуация в воздушном пространстве Н. А. Петров [1].

2. Генетический алгоритм Durand, N., J.-M. Alliot, и J. Noailles [2].

3. Разрешение конфликтов на основе потенциального поля W.E. Kelly and M. Eby [3].

Рассмотрим каждый метод подробнее.

1. Алгоритм предполагает, что рассматриваемое воздушное судно движется на постоянном заданном эшелоне с постоянной скоростью между поворотными пунктами полета. Другие самолеты, с которыми потенциально может произойти опасное сближение, летят на том же эшелоне. Запрещенные для полетов области задаются на сетке размером 5550 на 3550 точек, покрывающей территорию Европы с шагом 0,01°. Область опасного сближения с другими самолетами аппроксимируется многоугольником с 16 вершинами. Далее производится поиск координат всех вершин многоугольника. На сетке строится цифровая карта, аналогичная описанной в цифровой «карте безопасности», которая определяет, насколько далеко от запрещенных областей находится каждый узел сетки, лежащий вне этих областей. После построения сетки выполняется построение граница безопасности. Для нахождения границ используется модифицированный алгоритм трассировки Мура.

С целью определения траекторий облета выполняется поиск крайних точек границ безопасности. Найденная точка траектории для облета запрещенной области задается на удалении от последней. Таким образом маршрут перестраивается и уже включает в себя точку по облету запрещенной зоны.

К недостаткам можно отнести следующее: увеличения вычислительных операций, заметное увеличение погрешностей результатов, особенно на маршрутах большой протяженности, а также метод реализуется только на крейсерских режимах полета.

2. Генетический алгоритм использует три главных оператора: отбор, мутация и скрещивание. Целью метода является определить функцию пригодности, имеющую желаемые свойства, например, отсутствие конфликтов, будучи экономически эффективной. Для запуска алгоритма необходимо иметь множество «предков» (изначальные представители). В начале их количество мало, после процесса скрещивания и мутации их число значительно увеличивается. Процесс будет повторяться до тех пор, пока наблюдается улучшение. На каждом следующем шаге во внимание берутся лучшие образцы, полученные на предыдущем шаге.

Плюс данного метода заключается в том, что он позволяет за короткие сроки получить не строго оптимальное, но близкое к нему, решение.

К минусам можно отнести следующее: качество всего процесса сильно зависит от качества функции пригодности; если функция пригодности является сложной, частые вызовы снижают общую производительность; генетические алгоритмы плохо масштабируются в зависимости от сложности, большие популяции со многими параметрами охватывают большое про-

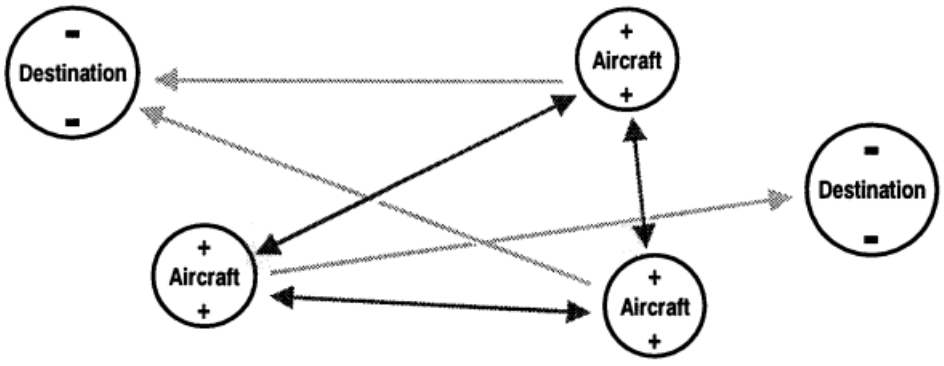


Рис. 1. Представление воздушных судов в виде «заряженных» объектов

странство поиска; генетические алгоритмы, как правило, сходятся к локальным оптимумам вместо того, чтобы находить глобальный оптимум; сертификация генетических алгоритмов (по крайней мере) затруднена в авиации.

3. Теория потенциальных полей основана на идее по моделированию проблемы, когда воздушное судно обрабатывается как электрон с отрицательным зарядом. Аэродромы в такой модели имеют положительный заряд, которые «притягивают» отрицательные. Таким образом воздушные суда будут «отталкиваться» друг от друга, т. е. лететь по наиболее вероятно бесконфликтному маршруту (рис. 1).

Таким образом, данный метод лучше всего себя показывает в разрешении конфликтов в локальных конфликтных ситуациях, так как в глобальных ситуациях этот процесс является более сложным и отнимает много больше времени. Отсюда следует проблема производительности при получении летных траекторий.

Описание разработанного метода по обнаружению конфликтной ситуации между двумя воздушными судами и оптимизации 4D-траектории

В статье предлагается метод по оптимизации 4D-траектории групп конфликтующих воздушных судов, который выполняет следующие задачи:

– выбор маршрута полета и наложение ограничений;

– моделирование полета группы воздушных судов с использованием алгоритма Дэйкстры;

– определение конфликтной ситуации;

– применение метода по сдвигу профиля полета воздушного судна для предотвращения возможной конфликтной ситуации.

Суть предложенного метода по оптимизации 4D-траектории заключается в смещении профиля полета летательного аппарата (ЛА) относительного его первоначального плана полета для предотвращения возможной КС. 4D-траектория i-го ВС – это последовательность координат, получаемая в результате прогнозирования траектории движения, тремя измерениями которой являются – высота (h_i), широта (φ_i) и долгота (α_i), а четвертым – время (t_i). Иначе это можно представить в виде:

$$\Theta_{ij} = (\varphi_i, \alpha_i, h_i), \qquad (1)$$

где i и j– номера 3D-точек маршрута движения Θ_{ij}, $i = 1, \ldots, k$; k – количество точек, задающих участок движения ВС.

Конфликтная ситуация может возникнуть при нарушении норм продольного и/или вертикального эшелонирования. Множество КС можно свести к трем типам:

1. КС при прохождении ВС через общую точку воздушного пространства.

2. КС при движении ВС по общему участку трассы.

3. КС при движении ВС по пересекающимся участкам трасс.

Минимальное расстояние между судами определяется по формуле

$$R_p = \sqrt{(x_{2p} - x_{1p})^2 + (z_{2p} - z_{1p})^2}, \qquad (2)$$

где x_{1p}, z_{1p} и x_{2p}, z_{2p} позиции ВС. Таким образом, если $R_s \le R_p$ (безопасное расстояние), то КС отсутствует, иначе КС обнаружена.

Оптимизация траектории движения ВС заключается в минимизации числа конфликтов между 4D-траекториями – критерий оценки эффективности.

Для моделирования и обнаружения конфликтной ситуации был выбран Airbus A306. Необходимые характеристики были взяты из BADA (The Base of Aircraft Data) [4]. Траектория полета будет изменяться у одного из двух рассматриваемых воздушных судов, таким образом примем летные характеристики ВС равными.

Процесс моделирования и оптимизации плановых траекторий движения ВС и основан на следующем:

1. Выбор аэродрома взлета и посадки.

2. Построение маршрута полета с использованием алгоритма Дейкстры.

3. Выполнение интерполяции между поворотными пунктами маршрута (ППМ).

4. Обнаружение КС путем экстраполяции координат.

5. Расчет оптимальной задержки, смещение профиля полета.

В качестве аэродромов взлета были выбраны Норильский и Иркутский, аэродромы посадки: Сочи и Москва (Домодедово).

Пример представления двух плановых траекторий полета воздушных судов приведен на рис. 2.

Для поиска оптимальной траектории полета используется теория графов, а именно алгоритм Дэйкстры – алгоритм поиска кратчайшего пути для заданного взвешенного графа с неотрицательными весами. Время, за которое алгоритм находит кратчайший путь, определяется $O(m + n \times \ln n)$.

Каждый ППМ траектории обозначен на рис. 2, таким образом необходимо выполнить

интерполяцию между точками плановых траекторий. Известны лишь те точки, в которых находятся ППМ $x_i (i \in 0, 1, ..., N)$, т. е. имеем представления о точках в $y_i = f(x_i)$. Задача интерполяции состоит в поиске такой функции $F(x_i) = y_i$, $i \in 0, 1, ..., N$.

Ниже представлен результат интерполяции траектории движения ВС по их ППМ. Результат интерполяции траекторий движения ВС приведен на рис. 3.

Предполагается, что между двумя бортами возникает конфликтная ситуация – их траектории пересекаются в некоторый момент времени (рис. 4).

Смысл метода по оптимизации 4D-траектории заключается в смещении профиля полета одного из воздушных судов.

Таким образом, имея предсказанную КС можно вычислить задержку. Задержка вычисляется из соображений оптимальности и безо-

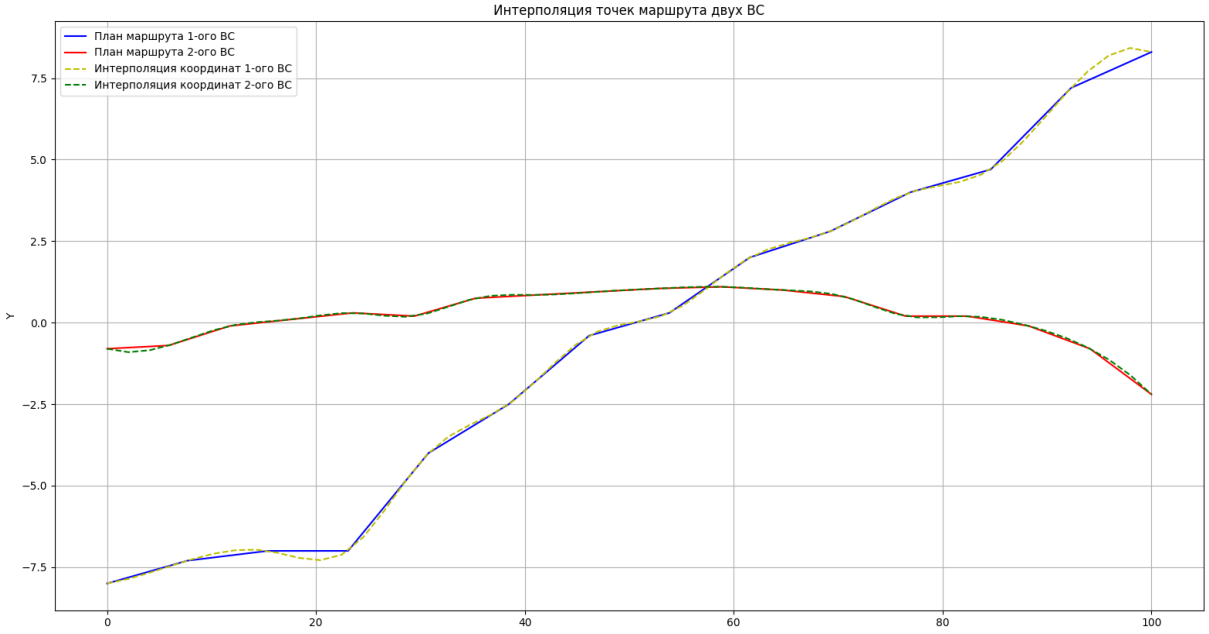


Рис. 3. Результат интерполяции траектории движения ВС

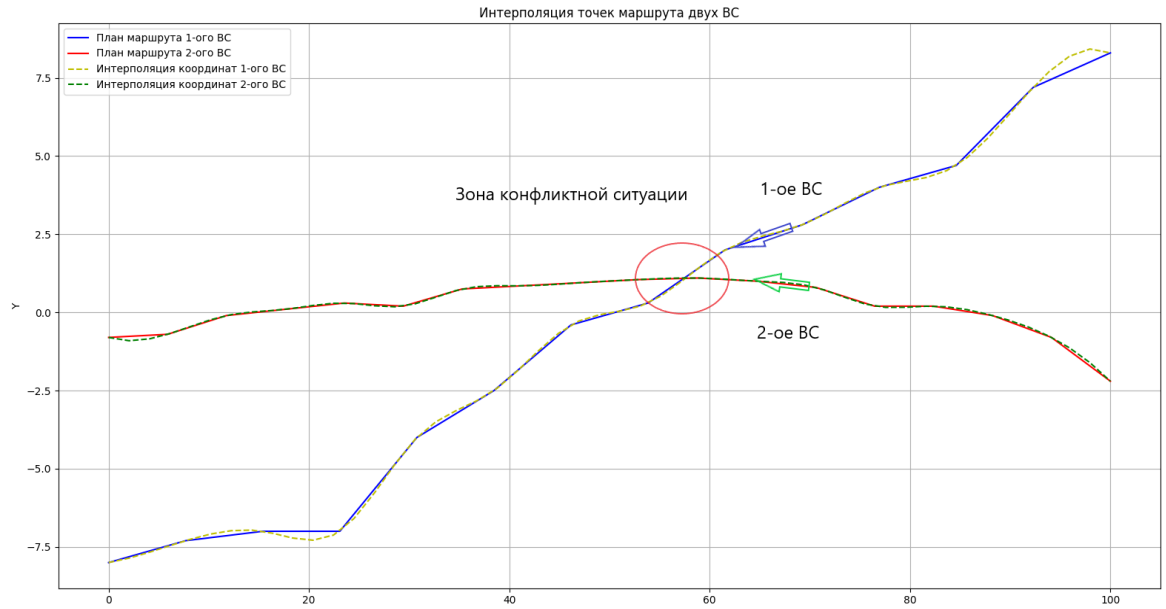


Рис. 4. Выявление КС

пасности полета: необходимо ежесекундно производить экстраполяцию координат ВС. Экстраполяция рассчитывается на будущие 5 минут полета – при полученных координатах x_i, y_i и рассчитанных параметрах движения (скорость V_n и курс Q_n и их приращения ΔV_n, ΔQ_n) возможно экстраполировать на $n + 1$ обзор значение координат x_{n+1}, y_{n+1}.

Пройденное расстояние рассчитывается по формуле:

$$L = V_n + T_0 + \frac{\Delta V_n}{2} * T_0^2, \quad (3)$$

Координаты определяются по следующим формулам:

$$x_{n+1} = x_n + L * \sin(Q_n + \Delta Q_n), \quad (4)$$

$$y_{n+1} = y_n + L * \cos(Q_n + \Delta Q_n), \quad (5)$$

Таким образом можно предсказать КС и сместить профиль ВС во времени, не изменяя его характеристик – скорости и курса. Данный метод позволяет сократить время пребывания ВС в полете за счет уменьшения количества совершаемых маневров, что, в свою очередь, ведет к снижению возникновения авиационных конфликтов.

В общем случае представленный метод можно описать следующим образом:

1. Для группы воздушных судов составляется план полета с учетом возможных ограничений и формируются траектории полета между ППМ.

2. Принимается информация о координатах ВС с органов наблюдения, например, с автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) и на основе этих данных производится экстраполяция координат с целью контроля и выявления возможных КС.

3. Циклически перебираются все 4D-траектории и производится оценка числа авиационных конфликтов.

4. Если была обнаружена возможная КС, то производится вычисление оптимальной задержки, таким образом выполняется смещение профиля полета во времени. Задержка должна быть вычислена таким образом, чтобы минимизировать критерий оптимальности. В данном случае критерием является число конфликтов между ВС.

Выводы

В данной статье приведен обзор известных методов по оптимизации 4D-траекторий ВС, описан алгоритм моделирования движения двух судов, имеющих КС, с использованием алгоритма Дэйкстры и экстраполяции координат.

Также предложен альтернативный метод по оптимизации траектории, суть которого заключается в смещении профиля полета воздушного судна. Он позволяет избежать привычных маневров по уходу с запланированной траектории полета для выхода из КС. Таким образом, ВС будет эксплуатироваться в воздухе меньше времени, тем самым снизив затраты таких ресурсов, как топливо и время.

Библиографиеский список

1. *Петров Н. А.* Разработка универсального алгоритма разрешения конфликтных ситуаций в воздушном пространстве при полете магистрального самолета // Научный вестник МГТУ ГА. С. 2–10.

2. *Durand N., J.-M. Alliot, J. Noailles.* Automatic aircraft conflict resolution using genetic algorithms. URL: https://www.researchgate.net/publication/2490053_Automatic_Aircraft_Conflict_Resolution_Using_Genetic_Algorithms (дата обращения: 15.10.2022).

3. *Kelly W. E., Eby M. S.* Advances in force field conflict resolution algorithms. URL: https://www.researchgate.net/publication/269210976_Advances_in_force_field_conflict_resolution_algorithms (дата обращения: 02.11.2022).

4. European organisation for the safety of air navigation. URL: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/022_BADA_User_Manual.pdf (дата обращения: 25.10.2022).

5. *Тимофеев С. Ю.* Методика расчета потенциальных конфликтных ситуаций в автоматизированной системе планирования воздушного движения. // Интернет-журнал Науковедение. 2014. С. 3–8.

УДК 681.323:629.7.05.(075)

Ю. П. Иванов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ АПОСТЕРИОРНОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ НЕВЫХОДА СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ЗА ДОПУСТИМЫЕ ГРАНИЦЫ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ

В работе исследуется спектральный метод оценок апостериорной достоверности принимаемых решений о невыходе случайного процесса за допустимые границы на скользящем интервале времени T на фоне помех. Оценка указанной достоверности получена на основе использования спектрально-финитного метода, в основе которого лежит представление моделей сигналов, определяемых случайными процессами, рядами Карунена-Лоэва на финитном скользящем интервале времени. В работе приведены оценки точности аппроксимации случайного сигнала квазидетерминированным процессом и определены области допустимых значений коэффициентов на основе использования разложения Карунена-Лоэва. Рассмотрен случай комплексной оценки апостериорной достоверности принимаемых решений о невыходе сигнала за пределы допуска при наличии многоканальной системы измерения полезного сигнала. Метод отличается простотой реализации и универсальностью относительно используемых моделей измерения.
Ключевые слова: *апостериорная достоверность, спектральный метод оценки, разложение Карунена-Лоэва, комплексная обработка сигналов, линейная модель измерения широкого вида сигналов.*

Yu. P. Ivanov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SPECTRAL METHOD FOR ESTIMATING THE A POSTERIORI RELIABILITY OF THE NON-OCCURRENCE OF A RANDOM PROCESS BEYOND THE PERMISSIBLE LIMITS ON A SLIDING TIME INTERVAL

The paper investigates the spectral method of estimating the a posteriori reliability of decisions made on the non-departure of a random process beyond the permissible limits on a sliding time interval T against the background of interference. The estimation of this reliability was obtained using the spectral-finite method, which is based on the representation of signal models determined by random processes, Karunen-Loev series on a finite sliding time interval. The paper provides estimates of the accuracy of approximation of a random signal by a quasi-deterministic process and defines the ranges of acceptable values of coefficients based on the use of the Karunen-Loev decomposition. The case of a comprehensive assessment of the a posteriori reliability of the decisions made on the non-departure of the signal beyond the tolerance limits in the presence of a multichannel measurement system of the useful signal is considered. The method is characterized by simplicity of implementation and versatility with respect to the measurement models used.
Keywords: *a posteriori reliability, spectral estimation method, Karunen-Loev decomposition, complex signal processing, linear measurement model of a wide range of signals.*

Введение

В задачах контроля состояния информационно-измерительных систем, качества технологических процессов, при прогнозировании безопасности полета летательного аппарата и работы ядерных установок, при наблюдении метеорологических и природных явлений, состояний пациентов больниц большое значение имеет оценка апостериорной достоверности двухальтернативного решения о принадлежности состояний рассматриваемых объектов допустимому классу состояний на выбранном интервале времени. Под апостериорной достоверностью контроля состояния технического объекта, определяемого случайным процессом на финитном интервале времени, будем понимать вероятность того, что данный случайный процесс не достиг заданных граничных значений на выбранном интервале времени по результатам измерения исследуемого процесса или при получении оптимальной его оценки. Как известно

[1, 2], в настоящее время нахождение рассматриваемой апостериорной достоверности на выбранном финитном интервале времени для класса случайных марковских процесса основывается на решении уравнений Стратановича-Кушнера (СК) относительно апостериорной плотности вероятности вектора состояния процесса при заданных начальных и граничных условиях. Решение дифференциальных уравнений СК в частных производных для марковских процессов даже в случае стационарности и нормальности исследуемых процессов и независящих от времени граничных условий является трудоемкой и в общем случае аналитически нерешенной задачей.

В данной работе представлен простой универсальный способ оценки апостериорной достоверности невыхода за допустимые пределы случайного нормального процесса на выбранном интервале времени.

Спектральный метод оценки апостериорной достоверности невыхода случайного нормального процесса за допустимые пределы на финитном интервале времени

Рассмотрим задачу оценки апостериорной достоверности недостижения случайным скалярным гауссовским, в общем случае, не стационарным не марковским процессом $X(t-\tau)$ с математическим ожидание $m_x(t-\tau)$ и известной корреляционной функцией $Kx(t-\tau,\ t-\tau_1)$ заданных границ на текущем интервале времени $\tau,\tau_1 \in T$, когда наблюдаемый процесс имеет вид

$$\mathbf{Y}(t-\tau) = \mathbf{\Phi}[X(t-\tau), t-\tau] + \mathbf{H}(t-\tau), \qquad (1)$$

где Ф[ ] – заданная, линейная, зависящая от времени t, векторная размерности $n\times 1$ функция гауссовского скалярного процесса $X(t-\tau)$ с известными математическим ожиданием $m_x(t-\tau)$ и корреляционной функцией $K_x(t-\tau,\ t-\tau_1)$; $\mathbf{H}(t-\tau)$ – случайный векторный размерности $n\times 1$ нормально распределенный с нулевым математическим ожиданием и известной матричной корреляционной функцией $\mathbf{K_H}(t-\tau,\ t-\tau_1)$ размерности $n\times n$, $\tau_1,\ \tau \in T$ процесс, характеризующий шумы или помехи измерения. Предполагается, что случайные процессы $X(t-\tau)$ и вектора $\mathbf{H}(t-\tau)$ статистически независимы, а также взаимно независимы компоненты вектора помех. Представим случайный процесс $X(t-\tau)$ на скользящем финитном интервале времени T с заданной точностью аппроксимации частичной суммой разложения Карунена-Лоэва. В этом случае модель измерения (1) приближенно можно представить в следующем виде [3, 4, 5]:

$$\mathbf{Y}(t-\tau) = \mathbf{\Phi}[\hat{X}^N(t-\tau), t] + \mathbf{H}(t-\tau), t). \qquad (2)$$

Квазидетерминированную модель случайного процесса $X(t-\tau)$ $\hat{\mathbf{X}}^N(t-\tau)$ в случае использования разложения Карунена-Лоэва можно определить следующими выражениями [4]:

$$\hat{X}^N(t-\tau) = \sum_{k=1}^{N} C_k(t)\psi(\tau), \tau \in T, \qquad (3)$$

$$C_k(t) = \int_0^T x(t-\tau)\psi_k^*(\tau)d\tau \qquad (4)$$

$$\lambda_k(t)\psi_k(\tau) = \int_0^T Kx(t-\tau, t-\tau_1)\psi_k(\tau_1)d\tau_1 \qquad (5)$$

где $\psi_k(\tau)$, $\psi^*{}_k(\tau)$ и $\lambda_k(t)$ – соответственно k-е базисная и сопряженная базисные ортонормальные функции, собственное значение интегрального уравнения (5) Фредгольма второго рода. Метод решения уравнения (5) для стационарных процессов можно найти в [3, 6]. Разложение, определяемое соотношениями (3) – (5), справедливо для случайных процессов с локально интегрируемыми корреляционными функциями $Kx(t-\tau,\ t-\tau_1)$ на квадрате $[0,T]\times[0,T]$ [6]. Если корреляционная функция $Kx(t-\tau,\ t-\tau_1)$ является положительно определенной, то собственные функции образуют полный ортогональный ряд [6].

Среднеквадратический функционал ошибки представления случайного процесса $X(t-\tau)$ на интервале времени $\tau \in T$ при ортонормальном базисе на основании теоремы Мерсера [4, 6] равен

$$I_N(t) = \int_0^T Kx(t-\tau, t-\tau)d\tau - \sum_{k=1}^{N}\lambda_k(t) = \sum_{k=N+1}^{\infty}\lambda_k(t), \qquad (6)$$

где собственные числа $\lambda_k(t)$ вещественны, неотрицательны и расположены в порядке убывания $\lambda_1(t)\geq\lambda_2(t)\geq\ldots\geq\lambda_N(t)$. Спектральная размерность N в уравнениях (3), (6) определяется, исходя из заданной относительной точности приближения R^2 случайного процесса $X(t-\tau)$ частичной суммой (3)

$$R(t,T) \leq \underbrace{\min}_{N} \frac{\sum_{k=1}^{N}\lambda_k(t)}{\int_0^T Kx(t-\tau, t-\tau)d\tau}.$$

Спектральная размерность N является функцией от значений $R(t,T)$, T и вида корреляционной функции $Kx(t,\tau)$. Коэффициенты $C_k(t)$,

$k=\overline{1,N}$ ряда (3) есть ортонормальные центрированные случайные величины, дисперсии которых равны

$$M[C_k(t)C_1^*(t)]=\lambda_k(t)\delta_{k,1},k,1=\overline{1,N},$$

где $\delta_{k,l}$ – символ Кронеккера.

Соотношение (2) на основании линейности оператора $\Phi_s[\ ]$ можно представить в следующем виде:

$$Y_s(t-\tau)\cong\sum_{k=1}^{N}C_k(t)\int_0^{T-\tau}\Phi_s(t-\tau_1)[\Psi_k(\tau_1,t,T)+ +m_x(t-\tau_1)]d\tau_1+H_s(t-\tau), \quad s=\overline{1,n}, \tag{7}$$

где $C_k(t)$ – случайная компонента N-мерного гауссовского вектора спектральных коэффициентов разложения Карунена-Лоэва $\mathbf{C}(t)$, компоненты которого независимы между собой, $\Phi_s(t-\tau_1)$, $s=\overline{1,n}$ – весовая функция линейного стационарного векторного оператора $\Phi[\ ]$, определяющая вид измеряемого сигнала в s-м канале комплексной системы, $\Phi(t-\tau_1)=\|\Phi_1(t-\tau_1),\ldots,\Phi_n(t-\tau_1)\|^T$ – n-мерная весовая функция, $H_s(t-\tau)$ – случайный гауссовский процесс, определяющий помехи или шумы s-го измерительного канала комплексной системы, с нулевым математическим ожиданием и известной корреляционной функцией $K_{Hs}(t-\tau,t-\tau_1)$, $\tau,\ \tau_1\in T$, векторы $\mathbf{C}(t)=\{C_1(t),\ldots,C_N(t)\}$ и $\mathbf{H}(t-\tau)=\{H_1(t-\tau),\ldots,\mathbf{H}_n(t-\tau)\}^T$ независимы между собой.

Вводя обозначения для преобразований сигнала в s канале

$$\varphi_{s,k}(\tau,t,T)=\int_0^T\Phi_s(\tau-\tau_1)\psi_k(\tau_1,t,T)d\tau_1,k=1,\ldots,N,$$

которые будем называть моментами весовой функции $\Phi_s(\tau-\tau_1)$ в базисе $\psi_k(\tau,t,T)\}$, $\omega_s(t,T)=\int_0^T\Phi_s(t-\tau_1)m_x(t-\tau_1)d\tau_1$ и подставляя в выражение (7), будем иметь:

$$Y_s(t-\tau)=\sum_{k=1}^{N}C_k(t)\varphi_{s,k}(\tau,t,T)+\omega_s(t-\tau)+ +H_s(t-\tau),\tau\in T,s=\overline{1,n}. \tag{8}$$

Моменты $\varphi_{s,k}(\tau,t,T)$ при $\tau=0$ легко находятся при помощи следующей формулы [7]:

$$\varphi_{s,k}(0,t,T)=\lim_{\tau\to0}\{\Phi_s(\psi_k(\tau,t,T)\}=\lim_{\tau\to0}\int_0^{T-\tau}\Phi_s(\tau-\tau_1)\psi_k(\tau_1,t,T)d\tau_1.$$

В частном случае воспроизведения самого сигнала, когда используется скалярный оператор преобразования $\Phi_s[X(t-\tau)]=X(t-\tau)$, имеем $\varphi_{k,s}(0,t,T)=\psi_k(0,t,T)$, и в этом случае оператор преобразования можно представить в следующем виде:

$$\varphi_{k,s}(0,t,T)=\int_{0-0}^{T+0}\delta_s(\tau)\psi_k(\tau,t,T)d\tau,s=1,\ldots,n,$$

где $\delta_s(\tau)$ – дельта-функция для s-го канала; в случае воспроизведения первой производной от сигнала $\Phi_s[X(t-\tau)]=\mathrm{d}X(t-\tau)/\mathrm{d}\tau$, $s=1,\ldots,n$,

$$\varphi_{s,k}(0,t,T)=\lim_{\tau\to0}\frac{d}{dt}\psi_k(-\tau,t,T),k=\overline{1,N}.$$

Оператор преобразования в этом случае можно также представить в следующем виде:

$$\varphi_{s,k}(0,t,T)=\int_{0-0}^{T+0}\delta^1(\tau)\psi_k(\tau,t,T),k=1,\ldots,N;$$

в случае экстраполяции сигнала на время ξ $\Phi_s[X(t-\tau)]=X(t+\xi-\tau)\varphi_{k,s}(\xi)=\psi_k(-\xi,t,T)$ или $\varphi_{k,s}(0,t,T)=\int_{-\infty}^{\infty}\delta_s(\tau+\xi)\psi_k(\tau,t,T)d\tau$ и т. д.

Учитывая, что случайный процесс $X(t-\tau)$ гауссовский, а коэффициенты его спектрального представления получены путем линейного преобразования, то априорная плотность распределения вектора $\mathbf{C}(t)$ будет нормальной, и коэффициенты $C_k(t)$ в этом случае являются независимыми величинами, дисперсии которых равны $\lambda_k(t)$, а математические ожидания $M[C_k]=0$, $k=1,\ldots,N$. Априорную плотность распределения вектора $\mathbf{C}(t)$ можно представить в следующем виде:

$$f(\mathbf{c}(t),t)=\frac{1}{(2\pi)^{r/2}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{r}\frac{c(t)_k^2}{\lambda_k(t)}\right. \tag{9}$$

Апостериорную плотность вероятности случайного вектора $\mathbf{C}(t)$, с учетом соотношения (9), применительно к модели измерения (2), можно представить в следующем виде [8]:

$$f[\mathbf{c}(t),t/\mathbf{y}(t-\tau)]= =k(t)f[\mathbf{c}(t),t]\exp\left\{\sum_{k=1}^{N}c(t)_k\cdot b_k(t)-\right. -\frac{1}{2}\sum_{k,p=1}^{N}l(t)_{k,p}c(t)_kc(t)_p\ \Big\}, \tag{10}$$

$$k(t)=\int_0^T f[\mathbf{c}(t),t]\exp\{\sum_{k=1}^{N}c(t)_kb(t)_k- -\frac{1}{2}\sum_{k,p=1}^{N}l_{k,p}(c(t)_kc(t)_p)\},\tau\in T,$$

где

$$b(t)_k = \sum_{s=1}^{n} \int_0^T g_{k,s}(t-\tau)[y_s(t-\tau) - \\ -\omega_s(t-\tau)]d\tau, k = \overline{1,N}, \quad (11)$$

$$l(t)_k = \sum_{s=1}^{n} \int_0^T g_{s,k}(t-\tau)[\varphi_k(\tau,t,T)d\tau, \; k = \overline{1,N}, \quad (12)$$

$\varphi_k(\tau,t,T)$, $\omega_s(t-\tau)$ – k-е компоненты соответствующих n-мерных векторов. Функции $g_{s,k}(t-\tau)$, $k = 1, \ldots, N$, $s = 1, \ldots, n$ в соответствии с выражениями (11), (12) с учетом линейности преобразования оператора Ф[ ] и независимости компонент помех измерения определяются из следующих уравнений [8]:

$$\sum_{s=1}^{n} \int_0^T g_{k,s}(t-\tau) K h_{s,s}(t-\tau, t-\tau_1)d\tau = \\ = \varphi_k(\tau_1, t, T), k = 1, \ldots, N. \quad (13)$$

Учитывая то, что априорная плотность распределения $f[\mathbf{c}(t),t]$ вектора $\mathbf{C}(t)$ является гауссовской, и при аппроксимации случайного процесса $X(t-\tau)$ частичной суммой разложения Карунена-Лоэва компоненты $C_k(t)$, $k = 1, \ldots, N$ вектора $C(t)$ независимы друг от друга, а дисперсии их равны $\lambda_k(t)$, выражение (10) можно представить следующим образом:

$$f[\mathbf{c}(t), t \,/\, \mathbf{y}(t-\tau)] = \\ = \frac{1}{2\pi^{N/2}\left|\mathbf{A}^{-1}(t)\right|^{1/2}} \exp\{-\frac{1}{2}[\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}(t)\mathbf{b}(t)]^T \times \\ \times \mathbf{A}(t) \times [\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}(t)\mathbf{b}(t)], \quad (14)$$

где $\mathbf{A}^{-1}(t)$ – апостериорная корреляционная матрица вектора $\mathbf{C}(t)$ размерности $N \times N$, элементы которой определяются соотношением [8]:

$$a(t)_{k,p} = \frac{1}{\lambda(t)_k} + l(t)_{k,p}, \; k, p = \overline{1,N}. \quad (15)$$

Качество оценок вектора $\mathbf{C}(t)$ можно определить следующим соотношением:

$$D\varepsilon^*(t) = Tr\{\mathbf{A}^{-1}(t)\}.$$

С учетом точности аппроксимации случайного процесса $X(t-\tau)$ частичной суммой разложения Карунена-Лоэва дисперсию ошибки оптимальной оценки полезного сигнала $X(t-\tau)$ на основании выражений (6), (15) определим соотношением:

$$D\varepsilon^*(t) = (0,t,T)^T \{\mathbf{A}^{-1}(t)\}(0,t,T) + \\ + \frac{1}{T}\left[\int_0^T K_x(t-\tau, t-\tau)d\tau - \sum_{i=1}^{N} \lambda(t)_k\right]. \quad (16)$$

Плотности вероятности $f[c_k(t), t/\mathbf{y}(t-\tau)]$, $k = 1, \ldots, N$ отдельных компонент вектора $\mathbf{C}(t)$ можно получить из соотношения (14) интегрированием по всем остальным переменным $c_1(t)$, $l \neq k$, $l = 1, \ldots, N$, при этом они имеют вид нормального закона распределения

$$f[c(t)_k, t \,/\, y(t-\tau)] = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi D a(t)_k}} \exp\left\{-\frac{[c(t)_k - ma(t)_k]^2}{2Da(t)_k}\right\}. \quad (17)$$

Апостериорные математические ожидания $m_{ak}(t)$ и дисперсии $D_{ak}(t)$, $k = 1, \ldots, N$ при этом равны [8]:

$$ma(t)_k = \sum_{l=1}^{N} \tilde{a}(t)_{k,j} b_k(t), \quad (18)$$

$$D(t)_k = \tilde{a}(t)_{k,k}, \quad (19)$$

где $\tilde{a}_{k,k}(t)$ $k, l = 1, \ldots, N$ – элементы матрицы $\mathbf{A}^{-1}(t)$. Матрица $\mathbf{A}(t)$, в общем случае, не является диагональной, так как функции $g(t-\tau)_{s,k}$ и $\varphi(\tau, t, T)_{s,k}$, определяющие величины $l(t)_{s,k}$, не являются ортогональными на интервале T. Если процессы $H_s(t-\tau)$, $s = \overline{1,n}$ не коррелированы и являются белыми шумами, а линейный оператор Ф[ ] является оператором воспроизведения сигнала $X(t-\tau)$, то матрица $\mathbf{A}(t)$ будет диагональной, и апостериорная плотность вероятности будет равна

$$f[\,c(t)/y(t-\tau)] = \prod_{k=1}^{N} f[c_k(t)/y(t-\tau)], \quad (20)$$

где

$$f[c(t)_k \,/\, y(t-\tau) = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi a(t)_{k,k}^{-1}}} \exp\left\{-\frac{[c(t)_k - a_{k,k}^{-1}(t) b_k(t)]}{2a(t)_{k,k}^{-1}}\right\}, \quad (21)$$

а функции $g(t, \tau)_{s,k}$ можно найти из уравнений [8]:

$$\int_0^T g(t-\tau_1)_{k,s} K h_{k,k}(t-\tau, t-\tau_1)d\tau_1 = \\ = \varphi_k(\tau, t, T)_{s,k}, \tau \in T, k = \overline{1,N}, s = \overline{1,n}. \quad (22)$$

Если не выполняются условия ортогональности функций $g_{ks}(t-\tau)$ и $\varphi_{ls}(\tau, t, T)$, то учитывая, что для элементов $a_{ij}^{-1}(t)$ часто справедливо неравенство [7]:

$$a_{kk}^{-1}(t,T) >> a_{kl}^{-1}(t), \; k \neq l; \; k, l = \overline{1,N},$$

решение задачи оценки достоверности недостижения процессом $X(t-\tau)$ заданных границ по результатам измерения $\mathbf{Y}(t-\tau)$ можно решать с учетом только основных диагональных элементов матрицы $\mathbf{A}^{-1}(t)$. Этот же подход целесообразно также использовать в том случае, если информация о виде корреляционной матрицы $\mathbf{K}_H(t-\tau,\ t-\tau_1)$, $\tau,\ \tau_1 \in T$ отсутствует, и известны только дисперсии шумов компонент вектора $\mathbf{H}(t-\tau)$. Будем называть решение поставленной задачи решением в диагональном приближении, имея при этом в виду, что данное решение может быть не только приближенным, но и точным. Представление апостериорной плотности вероятности $\mathbf{f}[c_k(t)/\mathbf{y}(t-\tau)]$ в форме (21) значительно уменьшает объем вычислений алгоритма оценки достоверности недостижения случайным процессом $X(t)$ заданных границ. Если при этом область допустимых значений для коэффициентов спектрального представления сигнала $\hat{X}^N(t)\ \ g_0{}^N(t, T)$ аппроксимирована N-мерным параллелепипедом, где $A_{вk}(t), A_{нk}(t)$, соответственно нормированные верхнее и нижнее значения k-й ($k = 1, \ldots, N$) грани параллелепипеда, то оценку апостериорной достоверности недостижения случайным процессом допустимых границ на скользящем интервале времени $[t-T,t]$ с учетом (20) можно представить в следующем виде:

$$\widehat{D}_{apost}(t,T) = \prod_{k=1}^{N} \widehat{D}_{apost_k}(t,T), \qquad (23)$$

где

$$\widehat{D}_{apost_k}(t,T) = \Phi\{An_{в,k}(t) - bn_k(t)\} - \Phi\{An_{н,k}(t) - bn_k(t)\} - \Phi\{\overset{\circ}{B}_{Hk}(t) - \overset{\circ}{b}_k(t)\}, \qquad (24)$$

$$An_{в,k}(t) = \frac{A_{в,k}(t)}{\sqrt{a^{-1}_{k,k}(t)}}, An_{н,k}(t) = \frac{A_{н,k}(t)}{\sqrt{a^{-1}_{k,k}(t)}}, bn_k(t) = \sqrt{a^{-1}_{k,k}(t)}b_k(t), \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}}dt.$$

Обычно дисперсия $\sigma x^2(t-\tau)$ исследуемого процесса $X(t-\tau)$ значительно превосходит дисперсии помех $\sigma h_s{}^2(t-\tau),\ k=\overline{1,n}$ погрешностей измерения ($\sigma x^2(t-\tau) >> \sigma h_s{}^2(t-\tau)$). В этом случае можно допустить, что $a_{kk}(t) \cong l_{kl}(t), k, l = 1, \ldots, N$. Введем новые обозначения $a_{uk,l}(t) = l_{k,l}(t), k, l = 1, \ldots, N$. Матрица $\mathbf{A}^{-1}{}_{и}(t)$, элементами которой являются $\tilde{a}_{ukl}(t)$, определяет апостериорную корреляционную матрицу ошибок оценок оптимально-инвариантной обработки сигналов. Качество оценок вектора $\mathbf{C}$ можно определить следующим соотношением:

$$D_{ЕСи1}(t) = Tr.\{\mathbf{A}^{-1}{}_{и}(t)\}.$$

Выбирая в качестве ортогонального базиса экспоненциальный базис Фурье и предполагая, что размерность спектральной модели сигнала N выбрана такой, при которой можно пренебречь ошибкой аппроксимации случайного процесса $X(t-\tau)$ частичной суммой разложения Карунена-Лоэва, дисперсию ошибки оптимально-инвариантной оценки полезного сигнала $X(t-\tau)$ определим следующим соотношением [7]:

$$D_{Еи}(t) = \Psi(0,t,T)^T\{\mathbf{A}^{-1}{}_{и}(t)\}\Psi(0,t,T).$$

Качество оценки при оптимально-инвариантной обработке будет несколько хуже, чем при оптимальной обработке сигналов $D_{Е}(t)$, определяемой выражением (19), т. е.

$$D_{Еи}(t) \geq D_{Е}(t).$$

Применение оптимально-инвариантной обработки сигналов целесообразно, когда неизвестна корреляционная функция случайного процесса $X(t-\tau)$ [8].

Апостериорную плотность распределения вектора $\mathbf{C}(t)$ при оптимально-инвариантной обработке сигналов можно записать следующим образом:

$$f_{и}[\mathbf{c}(t),t \,/\, \mathbf{y}(t-\tau)] = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}}\left|\mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\right|}\exp\{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\mathbf{b}(t)\right]^T \mathbf{A}^{-1}_{и}(t) \times \left[\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\mathbf{b}(t)\right],$$

$$f_{и}[\mathbf{c}(t),t \,/\, \mathbf{y}(t-\tau)] = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}}\left|\mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\right|}\exp\{-\frac{1}{2}\left[\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\mathbf{b}(t)\right]^T \times \mathbf{A}^{-1}_{и}(t) \times \left[\mathbf{c}(t) - \mathbf{A}^{-1}_{и}(t)\mathbf{b}(t)\right], \qquad (25)$$

Достоверность недостижения случайным процессом $X(t-\tau)$ заданных границ на интервале времени T при использовании соотношения (32) равна [9]

$$\widehat{D}apost(t,T) = \int_{g_0^N} f_{и}[\mathbf{c}(t) \,/\, \mathbf{y}(t-\tau)d\mathbf{c}(t), \tau \in T. \qquad (26)$$

При одних и тех же исходных априорных данных значение достоверности в рассматриваемом случае будет ниже, чем при определении ее в соответствии с выражением (27), т. е. справедливо следующее неравенство:

$$\widehat{Du}apost(t,T) \geq \widehat{D}apost(t,T).$$

Рассмотрим частный случай линейного преобразования $\Phi_s[X(t-\tau)] = X(t-\tau),\ \tau \in T$ случайного нормального скалярного стационарного сигнала с

математическим ожиданием $M[X(t-\tau)] = 0$ и корреляционной функцией $K_X(\tau) = \sigma_X^2 \exp\{-\alpha_X|\tau|\}$, т. е. рассмотрим воспроизведение сигнала $X(t-\tau)$ в установившемся режиме,. В этом случае n-мерная весовая функция $\Phi(\tau-\tau_1) = \mathbf{R}\delta(\tau-\tau_1)$, где $\mathbf{R}$ – n-мерный единичный вектор, $\delta(\tau-\tau_1)$ – дельта-функция, $\varphi_{k,s}(\tau, t, T) = \psi_k(\tau, t, T),)$, $\omega_k(t-\tau) = 0$, $i = 1, \ldots, N$. Процесс $X(t-\tau)$ измеряется двумя датчиками, т. е. $n = 2$, погрешности измерений которых взаимно независимы, а математические ожидания равны нулю [5]. Компоненты $H_s(t-\tau)$, $s = 1,2$ вектора погрешностей измерения полезного сигнала являются случайными стационарными гауссовскими процессами с известными корреляционными функциями $Kh_k(\tau) = \sigma h_k^2 \exp\{-\alpha h_k|\tau|\}$, $k = 1,2$. Оценим апостериорную достоверность $D_a(t)$ невыхода измеряемого сигнала $X(t-\tau)$ за пределы заданных нижней $A_н$ и верхней $A_в$ постоянных границ ($-A_н = A_в = A$) на интервале времени $\tau \in T$ при условии, что в начальный момент времени $t-T$ рассматриваемый сигнал находился в пределах поля допуска с вероятностью, определяемой нормальным законом распределением $N[0, \sigma_X]$ и заданным допуском $g_0 = A_в - A_н = 2A$.

В данном случае функции $\psi_k(t,\tau,T) = \psi_k(\tau, \alpha x \cdot T)$, $g_{s,k}(t,\tau) = g_{s,k}(\tau, \alpha x \cdot T)$, $k, l = 1, \ldots, N$ и вероятность $D_{0\text{apost.}}(\alpha x \cdot T)$ не зависят от t и рассматриваются как функция нормированного интервала наблюдения $\alpha x \cdot T$.

Определим апостериорную достоверность $D_{0\text{apost.}}(\alpha x \cdot T)$ в виде функции от значений параметров корреляционных функций полезного сигнала и погрешностей измерения, относительных интервала наблюдения $\alpha_X T$ и относительного поля допуска g_0/σ_X.

Используя представление $\widehat{X}^N(t-\tau)$, $\tau \in T$ случайного процесса $X(t-\tau)$ на интервале времени $\tau \in T$ в виде частной суммы разложения Карунена-Лоэва, можно записать в виде соотношения (3). Базисные функции $\psi_k(\tau, \alpha x \cdot T)$, $k = 1, \ldots, N$ соотношения (3) определятся в соответствии с видом корреляционной функции процесса $X(t-\tau)$ $K_X(\tau) = \sigma_X^2 \exp\{-\alpha_X|\tau|\}$ на основании выражения (5) в виде следующего соотношения [10]:

$$\psi_k(\tau, \alpha x \cdot T) = \frac{\sigma x}{\sqrt{\lambda_k}} \sqrt{\frac{2}{1+\frac{1}{d_k}}} \sin\left[\omega_k\left(t - \frac{T}{2}\right) + k\frac{\pi}{2}\right], \quad (27)$$

где собственные значения λ_k интегрального уравнения (3) и нормированные дисперсии d_k, $k = 1, \ldots, \infty$ коэффициентов разложения Карунена-Лоэва определяются соотношениями:

$$\lambda_k = \frac{2(\alpha x \cdot T)\sigma x^2 \cdot T}{(\alpha x \cdot T)^2 + (\omega_k \cdot T)^2}, \quad (28)$$

$$d_k = \frac{\lambda_k}{\sigma_x^2 \cdot T},$$

а ω_k, $k = 1,\ldots,\infty$ – соответствуют положительным корням, расположенным в порядке возрастания следующего уравнения:

$$\operatorname{tg}(\omega_k \cdot T) = \frac{2(\alpha x \cdot T)(\omega_k \cdot T)}{(\alpha x \cdot T)^2 - (\omega_k \cdot T)^2}. \quad (29)$$

Анализ изменения значений $\omega_k \cdot T$ от изменения величин $\alpha x \cdot T$ и k показал, что с увеличением k при заданном $\alpha x \cdot T$ значения $\omega_k \cdot T$ неограниченно возрастают, а при увеличении $\alpha x \cdot T$ при заданном k значения $\omega_k \cdot T$ возрастают, стремясь к установившимся значениям $\omega_k \cdot T = k\pi$, $k = 1,\ldots,\infty$. Изменение значений d_k $k = 2,\ldots, \infty$ при увеличении $\alpha x \cdot T$ и $T = \text{const}$ в диапазоне $0 < \alpha x \cdot T < \infty$ характеризуется вначале монотонным увеличением, затем наличием максимума и в дальнейшем асимптотическим стремлением к нулю при величине $\alpha x \cdot T$ стремящейся к бесконечности. Значение d_1 во всем диапазоне изменения $\alpha x \cdot T$, асимптотически стремятся к нулю при $\alpha x \cdot T \to \infty$. Начальные $\alpha x \cdot T = 0$ значения $d_1 = 1$, $d_k = 0$, $k = 2, \ldots, \infty$. Анализ также показал, что наиболее существенный вклад в обеспечение требуемой точности среднеквадратической аппроксимации случайного процесса $X(t)$ частичной суммой ряда Карунена-Лоэва в области значений $0 < \alpha x \cdot T \le 1$ (в ближней зоне) вносят первых одна-три компоненты ряда (3). С увеличением значения $\alpha x \cdot T$ число N компонент ряда, необходимое для обеспечения относительной точности R^2, возрастает.

Область допустимых значений случайных величин C_k, $k = 1, \ldots, N$ в этом случае определяется из следующей системой уравнений [9]:

$$\begin{cases} \sum\limits_{k=1}^{N} Cn_k \sqrt{\dfrac{2}{1+\dfrac{1}{d_k}}} \sin\left[\omega_k\left(t - \dfrac{T}{2}\right) + k\dfrac{\pi}{2}\right] \le \\ \quad \le k(\alpha x \cdot T) Aвп, \\ \sum\limits_{k=1}^{N} Cn_k \sqrt{\dfrac{2}{1+\dfrac{1}{d_k}}} \sin\left[\omega_k\left(t - \dfrac{T}{2}\right) + k\dfrac{\pi}{2}\right] \ge \\ \quad \ge k(\alpha x \cdot T) Aнп, \end{cases} \quad (30)$$

где $C_{nk\text{значений}} = C_k / \sqrt{\lambda_k}$, $k = 1, \ldots, N$ – нормированные значения коэффициентов ряда (4).

Допустимая нормированная ошибка среднеквадратического приближения случайного процесса $X(t)$ частичной суммой (27) может быть

оценена на основе соотношения (6) следующим неравенством:

$$1 - R \le 1 - \sum_{k=1}^{N} d_k.$$

Точность аппроксимации сигнала $X(t-\tau)$ разложением Карунена-Лоэва при $R = 0{,}9$ обеспечивается при $N = 2$ в диапазоне $0 \le \alpha x \cdot T \le 0{,}8$, при $N = 3$ в диапазоне $0 \le \alpha x \cdot T \le 1{,}25$, при $N = 4$ в диапазоне $0 \le \alpha x \cdot T \le 1{,}75$; при $R = 0{,}95$ обеспечивается при $N = 2$ в диапазоне $0 \le \alpha x \cdot T \le 0{,}4$, при $N = 3$ в диапазоне $0 \le \alpha x \cdot T \le 0{,}6$, при $N = 4$ в диапазоне $0 \le \alpha x T \le 0{,}85$. Апостериорная плотность вероятности случайного вектора $\mathbf{C}(t)$ по результатам наблюдения 2-мерного случайного процесса $\mathbf{Y}(t-\tau)$ на интервале времени $\tau \in T$ определяется выражениями (21), где компоненты вектора $\mathbf{b}(t, \alpha x \cdot T)$ и матрицы $\mathbf{A}(\alpha x \cdot T)$ на основании формул (11), (12) и с учетом стационарности рассматриваемых случайных процессов и линейного преобразования $\mathbf{\Phi}[\ ]$ равны:

$$b_k(\alpha x \cdot T) = \sum_{s=1}^{2} \int_0^T g_{s,k}(\tau, \alpha x \cdot T) y(t-\tau) d\tau, k = \overline{1,N}, \quad (31)$$

$$l_{k,l}(\alpha x \cdot T) = \sum_{s=1}^{2} \int_0^T g_{s,k}(\tau, \alpha x \cdot T) \psi_l(\tau, \alpha x \cdot T) d\tau, \quad k,l = \overline{1,N}. \quad (32)$$

Функции $g_{s,k}(\tau, \alpha x \cdot T)$, $k,l = \overline{1N}$, $\overline{s = 1n}$ на основании выражений (13) определяются следующими интегральными уравнениями, метод решения которых изложен в [ ]:

$$\int_0^T g_{k,s}(\tau_1, \alpha x \cdot T) K h_{s,s}(\tau - \tau_1) d\tau_1 = \psi_k(\tau, \alpha x \cdot T), \tau \in T, k = \overline{1,N}, s = 1,2. \quad (33)$$

Для заданных корреляционных функций $Kh_s(\tau) = \sigma h_s{}^2 \exp\{-\alpha h_s |\tau|\}$, $s = 1, 2$ погрешностей измерения датчиков информации и при $\varphi_k(\tau, \alpha x \cdot T) = \psi_k(\tau, \alpha x \cdot T)$ $k = 1, \ldots, N$ функции $g_{k,s}(\tau, \alpha x \cdot T)$ будут равны [11]:

$$g_{k,s}(\tau, \alpha x \cdot T) = \frac{1}{\sigma h_s^2} \left\{ \frac{\alpha h_s}{2} \psi_k(\tau, \alpha x \cdot T) - \right.$$
$$- \frac{1}{2\alpha h_s} \psi_k''(\tau, \alpha x \cdot T) + \left[\frac{1}{2} \psi_k(0, \alpha x \cdot T) - \right.$$
$$- \frac{1}{2\alpha h_s} \psi_k'(0, \alpha x \cdot T) \delta(\tau) + \quad (34)$$
$$+ \left. \left[\frac{1}{2} \psi_k(T, \alpha x \cdot T) + \frac{1}{\alpha h_s} \psi_k'(t, \alpha x \cdot T) \right] \delta(t - \tau), \right.$$
$$\tau \in T, k = \overline{1,N}, s - 1,2.$$

Подставляя соотношение (34) в выражение (32), для $k = 1,2$ получим:

$$l_{1,1}(\alpha x \cdot T) = \sum_{s=1}^{2} \frac{1}{2\alpha h_s \sigma h_s^2} \left[\alpha h_s{}^2 + \omega_1^2 + \right.$$
$$\left. + 2\alpha h_s p_1^2 \sin \frac{\omega_1 T}{2} \right],$$
$$l_{1,2}(\alpha x \cdot T) = l_{2,1}(\alpha x \cdot T) = 0, \quad (35)$$
$$l_{2,2}(\alpha x \cdot T) = \sum_{s=1}^{2} \frac{1}{2\alpha h_s \sigma h_s^2} \left[\alpha h_s{}^2 + \omega_2^2 + \right.$$
$$\left. + 2\alpha h_s p_2^2 \sin^2 \frac{\omega_2 T}{2} + 2 p_2^2 \sin \frac{\omega_2 T}{2} \cos \frac{\omega_2 T}{2} \right],$$

где $p_k(\alpha x \cdot T) = \frac{\sigma x}{\sqrt{\lambda_k}} \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{1}{d_k})}}$, $k = 1,2$, ω_k, $k = 1$, 2… зависят от значений $\alpha x \cdot T$, и определяются как положительные корни уравнения (29). Для определения компонент $\tilde{a}_{k,l}(\alpha x \cdot T)$, $k, l = 1, \ldots, N$ матрицы $\mathbf{A}^{-1}(\alpha x \cdot T)$ необходимо также знать значения $\lambda_k(\alpha x \cdot T)$, $k = 1, \ldots, N$, которые определяются в данном случае соотношением (28) и зависят от $\alpha x \cdot T$, $\sigma_X{}^2$. Если при представлении сигнала $X(t-\tau)$ ограничится двумя компонентами $C_k(t)$, $k = 1,2$ вектора $\mathbf{C}(t)$, и учесть, что спектральные компоненты не коррелированы и учесть гауссовский закон их распределения, то они будут независимыми между собой, а матрица $\mathbf{A}(\alpha x \cdot T)$ в этом случае является диагональной и апостериорные дисперсии случайных величин $C_k(t)$ будут равны

$$\tilde{a}_{k,k}(\alpha x \cdot T) = [\frac{1}{\lambda_k(\alpha x \cdot T)} + l_{k,k}(\alpha x \cdot T)]^{-1}, k = 1,2. \quad (36)$$

В этом случае апостериорные плотности распределения вектора $\mathbf{C}(t)$ $f[\mathbf{c}(t)/\mathbf{y}(t-\tau)]$ и его компонент $C_k(t)$ $f[c_k(t)/\mathbf{y}(t-\tau)]$ определяются соответственно соотношениями (20) и (21)). Апостериорную достоверность недостижения случайным процессом $X(t-\tau)$ на интервале времени $\tau \in T$ заданных границ $A_н$ и $A_в$ на основе выражения (27) можно оценить следующим соотношением:

$$\widehat{D}apost(\alpha x \cdot T) = \int_{g_0^2(\alpha x \times T)} \prod_{k=1}^{2} f[c_k / \mathrm{y}(t-\tau)] dc_k. \quad (37)$$

Наиболее адекватными и простыми способами определения области допустимых значений $g_0{}^N(\alpha x \cdot T))$ коэффициентов $C_k(t)$, $k = 1,2$ модели представления случайного процесса $X(t-\tau)$ применительно к рассматриваемым границам являются прямоугольники или 2-мерные ром-

бы. При использовании в качестве аппроксимирующей области 2-мерного ромба оценка апостериорной достоверности будет равна:

$$\widehat{D}apost_{01}(\alpha x\cdot T)=\frac{1}{2\pi}\times$$
$$\times\int_0^{g\text{н}2(\alpha x\cdot T))}\int_0^{g\text{н}1(\alpha x\cdot T)\left[1-\frac{c_1}{g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}\right]}e^{-\frac{1}{2}\{[c_2]^2+[c_1]^2\}}\times$$
$$\times dc_1dc_2+\frac{1}{2\pi}\int_{-g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}^{0}\int_0^{g\text{н}1(\alpha x\cdot T)\left[1+\frac{c_1}{g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}\right]}\times$$
$$\times e^{-\frac{1}{2}\{[c_2]^2+[c_1]^2\}}dc_1dc_2+\frac{1}{2\pi}\int_0^{g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}\times \quad (38)$$
$$\times\int_{-g\text{н}1(\alpha x\cdot T)[1-\frac{c_1}{g\text{н}(\alpha x\cdot T)}]}^{0}e^{-\frac{1}{2}\{[c_2]^2+[c_1)]^2\}}\times$$
$$\times dc_1dc_2+\frac{1}{2\pi}\int_{-g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}^{0}\int_{-g\text{н}1(\alpha x\cdot T)[1+\frac{c_1}{g\text{н}2(\alpha x\cdot T)}]}^{0}\times$$
$$\times e^{-\frac{1}{2}\{[c_2)]^2+[c_1]^2\}}dc_1dc_2,$$

где

$$g\text{н}1(\alpha x\cdot T)=A\text{н}\cdot\frac{\sqrt{\lambda_1\tilde{a}_{1,1}(\alpha x\cdot T)}}{(\sqrt{\sigma x^2\cdot T})\cdot\max\{\left|\psi_1(\tau,\alpha x\cdot T)\right|\}},$$
$$g\text{н}2(\alpha x\cdot T)=A\text{н}\cdot\frac{\sqrt{(\lambda_1+\lambda_2)\tilde{a}_{2,2}(\alpha x\cdot T)}}{(\sqrt{\sigma x^2\cdot T})\cdot\max\{\left|\psi_2(\tau,\alpha x\cdot T)\right|\}},$$

$A_{\text{н}}=\dfrac{A}{\sigma_X}$, $A_{\text{н}}$ – нормированная абсолютная величина допустимой границы для значений случайного процесса $X(t-\tau)$ $A=A_{\text{в}}=-A_{\text{н}}$, $g1(\alpha x\cdot T)$, $g2(\alpha x\cdot T)$ – нормированные максимально-допустимые значение случайной величины $C_k(t)$, $k=1,2$ при диагональном представлении матрицы $\mathbf{A}^{-1}$, $\tilde{a}_{k,k}(\alpha x\cdot T)$, $k=1,2$ – диагональные элементы матрицы $\mathbf{A}^{-1}$. Функции

$$\frac{\sqrt{\lambda_1\tilde{a}_{1,1}(\alpha x\cdot T)}}{\sqrt{(\sigma x^2\cdot T)}\cdot\underbrace{\max}_{\tau}\{\left|\psi_1(\tau,\alpha x\cdot T)\right|\}},$$
$$\frac{\sqrt{(\lambda_1+\lambda_2)\tilde{a}_{2,2}(\alpha x\cdot T)}}{\sqrt{(\sigma x^2\cdot T)}\cdot\underbrace{\max}_{\tau}\{\left|\psi_2(\tau,\alpha x\cdot T)\right|\}}$$

при каждом значении $\alpha_X T$ учитывают относительную точность представления случайного процесса $X(t-\tau)$ частичной суммой разложения Карунена-Лоэва. Введение функций $\underbrace{\max}_{\tau}\{\left|\psi_k(\tau,\alpha x\cdot T)\right|\}$ обусловлено учетом влияния k-й базисной функции $\psi_k(\tau,\alpha x\cdot T)$ $k=1,2$ на значение допустимого значения для k-ого спектрального коэффициента.

Заключение

В работе представлен спектральный метод оценок апостериорной достоверности принимаемых решений о невыходе случайного гауссовского процесса за допустимые границы на скользящем интервале времени T на фоне помех. Достоверность определена вероятностью принимаемого двухальтернативного решения о нахождении сигнала в пределах заданных границ на выбранном интервале времени по результатам его измерения. Оценка указанной достоверности получена на основе использования спектрального представления моделей сигналов, определяемых случайными процессами, рядами Карунена-Лоэва на финитном скользящем интервале времени. В работе приведены оценки точности аппроксимации случайного сигнала квазидетерминированным процессом и определены области допустимых значений коэффициентов. Рассмотрен случай комплексной оценки апостериорной достоверности принимаемых решений о невыходе сигнала за пределы допуска при наличии многоканальной системы измерения полезного сигнала. Рассмотренный метод оценки апостериорной достоверности оценки отличается универсальностью по отношению к используемым моделям измерения, простым алгоритмом его реализации и оценки его качества.

Библиографический список

1. *Сосулин Ю. Г.* Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Сов. радио, 1978.

2. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории случайных функций. М.: Наука Физматгиз, 1968.

3. *Френкс Л.* Теория сигналов. М.: Советское радио, 1978.

4. *Иванов Ю. П., Бирюков Б. Л.* Информационно-статистическая теория измерений. Модели сигналов и анализ точности систем: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2008.

5. *Иванов Ю. П., Синяков А. Н., Филатов И. В.* Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: учеб. пособие / Под ред. заслуженного деятеля науки и техники РСФСР доктора технических наук профессора В. А. Боднера. Л.: Машиностроение, 1984.

6. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. В 2 Т. Т. 1. М.: Советское радио, 1972.

7. *Перов В. П.* Прикладная спектральная теория оценивания. ГРФМЛ, 1982.

8. *Сысоев П. П.* Оценки параметров, обнаружение и различение сигналов. М.: Наука, 1969.

9. *Иванов Ю. П.* Методы оценки достоверности аттестации и прогнозирования состояния измерительных систем // Оборонная техника. Научно-технич. сб. 1995. № 9–10. С. 61–66.

10. *Пугачев В. С.* Теория случайных функций. М.: Физматгиз, 1962.

11. *Писаренко В. Ф., Розанов Ю. А.* Некоторые задачи для стационарных процессов на конечном интервале, приводящим к интегральным уравнениям Винера-Хопфа // Проблемы передачи информации. 1963. Вып. 14.

УДК 621.391.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-30-35**

Ю. П. Иванов*
кандидат технических наук, доцент
Н. С. Красненков*
магистрант
Д. Н. Семенов*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИНИТНО-ВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ С ОБРАТНОЙ И БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В данной работе проведен сравнительный анализ характеристик оптимальных финитно-временных фильтраций без обратной связи и с обратной связью, которые являются альтернативными методами фильтрации Калмана. Анализ сводится к оценке по характеристикам: точность, робастность и помехозащищенность, с целью выбора наиболее рационального метода обработки сигналов относительно выбранной модели измерения.
Ключевые слова: *финитно-временная обработка, обратная связь, фильтр Калмана, робастность, помехозащищенность, точность.*

Y. P. Ivanov*
PhD, Tech., Associate Professor
N. S. Krasnenkov*
Postgraduate student
D. N. Semenov
Postgraduate student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF FINITE-TIME PROCESSING METHODS WITH AND WITHOUT FEEDBACK

In this paper, a comparative analysis of the characteristics of optimal finite-time filtering without feedback and with feedback, which are alternative methods of Kalman filtering, is carried out. The analysis is reduced to an assessment of the characteristics of accuracy, robustness and noise immunity, in order to choose the most rational method of signal processing with respect to the chosen measurement model.
Keywords: *finite-time processing, feedback, Kalman filter, robustness, noise immunity, accuracy.*

Введение

В настоящее время широко используется способ фильтрации сигналов на основе фильтра Калмана. Данный фильтр традиционно считается наилучшим за счет своих достоинств и характеристик [1, 2], таких как линейность и оптимальность по критерию среднего квадрата ошибки оценки. При этом фильтрация Калмана является рекуррентным методом обработки сигналов, обеспечивая экономность используемой памяти вычислителей и наивысшую точность оценки в случае наличия гауссовской линейной модели измерения с аддитивной погрешностью [3].

Однако фильтр Калмана обладает рядом недостатков [4], к которым можно отнести: требование к наличию свойства марковости полезного сигнала, что приводит к снижению универсальности метода обработки, а также наличие обратной связи является причиной неустойчивой работы алгоритма при изменении входных данных, что в свою очередь приводит к низкой робастности и помехозащищенности. Кроме того, в алгоритме фильтра Калмана отсутствует универсальность в случае использования модели помехи в виде белого шума или в виде коррелированного случайного процесса.

Для устранения указанных недостатков фильтрации Калмана, были разработаны новые методы оценки сигналов на основе финитно-временной обработки сигналов с обратной и без обратной связи [4, 5].

Финитно-временная обработка без обратной связи является устойчивой за счет отсутствия обратной связи, а также универсальной относительно коррелированности или не коррелированности погрешностей моделей измерения. Указанная обработка является оптимальной по среднему квадрату ошибки оценки на финитном интервале времени, простая при реализации алгоритмов в ее обработке, не требует представления в пространстве состояний сигналов, и она асимптотически приближается к точности Калмана с увеличением количества используемых измерений во времени.

Несмотря на достоинства финитно-временной фильтрации, она уступает по точности фильтрации Калмана.

Для устранения данного недостатка финитно-временной обработки без обратной связи была разработана финитно-временная обработка с обратной связью, которая является также оптимальной по среднему квадрату ошибки оценки, совпадает по точности с фильтром Калмана, является более универсальной относительно используемых моделей измерения. Данный метод не требует представления сигналов в пространстве состояний.

В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительного анализа характеристик финитно-временной обработки с обратной связью и без обратной связи по точности, робастности и помехозащищенности.

Математическое описание финитно-временного метода фильтрации с обратной связью

В данной работе используется следующая модель измерения, которая подается на вход фильтра финитно-временной обработки с обратной связью [5]:

$$Y_i = X_i + H_i,\ i = 1, 2, .., n, \qquad (1)$$

где Y_i – результат измерений в момент времени i; X_i – оцениваемый сигнал; H_i – аддитивная помеха измерений.

Результат измерений Y_i является скалярным случайным произвольным временным рядом. Модель оцениваемого сигнала X_i является случайной, произвольной, в общем случае нестационарным и не гауссовским случайным процессом. Аддитивная помеха измерений H_i является нестационарным, гауссовским, коррелированным или не коррелированным случайным процессом.

Для оценки полезного сигнала формируется вектор в виде следующего соотношения:

$$\mathbf{Z1}_i = \left| Y_i, \hat{X}^*_{i-1}, ..., \hat{X}^*_{i-r+1} \right|^T, \qquad (2)$$

где Y_i – текущий результат измерений; $\hat{X}^*_p$, $p = i–1, i–2, \ldots, i–r+1$ – оптимальные оценки сигнала, полученные в r–1 моменты времени.

На основании следствия теоремы ортогонального проецирования для выполнения оптимальности по критерию среднего квадрата ошибки оценки должно выполняться следующие соотношение:

$$M[(\hat{\mathbf{X1}}^* - \mathbf{X1}) \times (\mathbf{S} - \hat{\mathbf{X1}}^*)^T] = \mathbf{0}, \qquad (3)$$

где $\hat{\mathbf{X1}}^*$ – вектор оценки полезного сигнала, размерности $r\times1$; $\mathbf{X1}_i = \left| X_i, X_{i-1}, ..., X_{i-r+1} \right|^T$ – вектор полезного сигнала, размерности $r\times1$; $\mathbf{S}$ – произвольная оценка, размерности $r\times1$; $\mathbf{0}$ – матрица из нулевых элементов, размерности $r\times r$.

Исходя из соотношения (3) оптимальная по критерию среднего квадрата ошибки оценки матрица $\mathbf{A}_i$ размерностью $r\times r$ преобразующая вектор результатов измерения по формуле (2) в вектор оценок $\hat{\mathbf{X1}}^*_i$ представляется в следующем виде:

$$\mathbf{A}^*_i = \mathbf{Kx1}_i\mathbf{z1}_i \times \mathbf{Kz1}_i^{-1}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{Kx1}_i\mathbf{z1}_i$ – матрица взаимных корреляционных моментов для векторных сигналов $\mathbf{X1}_i$ и выходного сигнала $\mathbf{Z1}_i$ размерности $r\times r$; $\mathbf{Kz1}_i$ – матрица корреляционных моментов входного сигнала $\mathbf{Z1}_i$, размерности $r\times r$.

Указанные выше матрицы представим в следующем виде:

$$\mathbf{Kx1}_i\mathbf{z1}_i = \begin{Vmatrix} Kx_iy_i,\ Kx_i\hat{x}^*_{i-1}, \ldots\ldots\ldots\ldots Kx_i\hat{x}^*_{i-k}, \\ \ldots\ldots\ldots Kx_i\hat{x}^*_{i-r+1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Kx_{i-k}y_i, Kx_{i-k}\hat{x}^*_{i-1}, \ldots\ldots\ldots Kx_{i-k}\hat{x}^*_{i-k} \\ \ldots\ldots\ldots Kx_{i-k}\hat{x}^*_{i-r+1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Kx_{i-r+1}y_i, Kx_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-1}, \ldots \\ Kx_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-r} \ldots\ldots\ldots Kx_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-r+1} \end{Vmatrix} \qquad (5)$$

$$\mathbf{Kz1}_i = \begin{Vmatrix} Ky_iy_i,\ Ky_i\hat{x}^*_{i-1}, \ldots\ldots\ldots\ldots Ky_i\hat{x}^*_{i-k}, \\ \ldots\ldots\ldots Ky_i\hat{x}^*_{i-r+1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ K\hat{x}^*_{i-k}y_i, K\hat{x}^*_{i-k}\hat{x}^*_{i-1}, \ldots\ldots\ldots K\hat{x}^*_{i-k}\hat{x}^*_{i-k} \\ \ldots\ldots\ldots K\hat{x}^*_{i-k}\hat{x}^*_{i-r+1} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ K\hat{x}^*_{i-r+1}y_i, K\hat{x}^*_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-1}, \ldots K\hat{x}^*_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-r} \\ \ldots\ldots K\hat{x}^*_{i-r+1}\hat{x}^*_{i-r+1} \end{Vmatrix} \qquad (6)$$

здесь автокорреляционные и взаимно корреляционные моменты $Kx_g y_i$, $Kx_i\hat{x}_g^*$, $Ky_i y_i$, $Ky_i\hat{x}_g^*$, $K\hat{x}_g^* y_i$, $K\hat{x}_g^*\hat{x}_g^*$ оцениваемых сигналов X_i, результатов измерения Y_i, сигналов X_g и оптимальных оценок $\hat{X}_g^*$ в моменты времени $g = i–1$, $i–2$, …, $i–r+1$.

Оптимальный вектор оценок $X1$ фильтрации и интерполяции исходного сигнала X_i в следующем виде:

$$\hat{X}\mathbf{1}_i^* = A_i^* \cdot Z\mathbf{1}_i + \hat{X}\text{н}\mathbf{1}_i, \tag{7}$$

где $\hat{X}\text{н}\mathbf{1}_i$ – вектор несмещенных оценок, и определяется по следующему выражению:

$$\hat{\mathbf{X}}\text{н}\mathbf{1}_i = [\mathbf{I} - \mathbf{A}_i^*] \cdot M[\mathbf{X1}_i] - \mathbf{A}_i^* \cdot M[\mathbf{H1}_i], \quad i = r, r+1, ..., n. \tag{8}$$

где $M[\mathbf{X1}_i]^T = \{M[X_i], M[X_{i-1}], M \ldots, M[X_{i-r+1}]\}$ – математическое ожидание вектора $\mathbf{X1}_i$;

$M[\mathbf{H1_i}]^T = \left|M[H_i], M[\text{E}^*_{i-1}], ..., M[\text{E}^*_{i-r+1}]\right|$ – математическое ожидание, состоящие из помехи $\mathbf{H1}_i$ и ошибки оптимальной оценки $M[\text{E}_k^*]$.

На основе приведенного выше выражения (3) получим матричные выражения, включающие уравнение Винера:

$$\begin{aligned} &K[(\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^* \times \hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^{*T})] = K[(\mathbf{X1}_i \times \hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^{*\mathbf{T}})], \\ &K[(\mathbf{X1}_i \times \mathbf{Z1}_i^T)] = K[(\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^* \times \mathbf{Z1_i}^T)]. \\ &K[(\mathbf{H1}_i \times \hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^{*T})] = K[(\mathbf{X1_i} \times \mathbf{X1}_i^T)] - \\ &-K[(\hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^* \times \hat{\mathbf{X}}\mathbf{1}_i^{*T})] = \\ &= K[(\Sigma_i^* \times \Sigma_i^{*T})] \end{aligned} \tag{9}$$

Из выражений (9), при условии некоррелированности сигнала и помехи, получаем следующие скалярные соотношения:

$$\begin{aligned} &K[(\hat{\mathbf{X}}_i^*)^2] = K[(X_i\hat{\mathbf{X}}_i^*)], \\ &K[(X_iY_{i-p})] = Kx_{i,i-p}, \\ &K[(X_{i-l}\hat{\mathbf{X}}_{i\text{-}d}^*)] = K[(\hat{X}_{i-l}^* \supsetneq \hat{X}_{i-d}^*)], \\ &K[(H_i\hat{X}_{i\text{-}d}^*)] = K[(X_i \supsetneq X_{i-d})] - \\ &-K[(X_i \supsetneq \hat{X}_{i-d}^*)] = K[(\Sigma_i^* \cdot \Sigma_{i-d}^*)], \end{aligned} \tag{10}$$

где $p = 0, 1, ..., r-1$, $l, d = 1, 2, ..., r-1$,

здесь $Kx_{i,i-1}$ – взаимный коррелированный момент оцениваемого сигнала X_i.

Перепишем выражения матрица корреляционных моментов полезного сигнала и входного сигнала, с учетом приведенных выше уравнений (4), (8) и 10, так же учтем некоррелированность сигнала и помехи измерения:

$$\mathbf{Kx1}_i\mathbf{z1}_i = \left\| \begin{matrix} Dx_i, \quad \rho x_{i,i-1} \cdot D\hat{x}_{i-1}^*, ..., \rho x_{i,i-1} \cdot \\ \cdot K\hat{x}_{i-1,i-k}^*, ..., \rho x_{i,i-1} \cdot K\hat{x}_{i-1,i-r+1}^* \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Kx_{i,i-k}, K\hat{x}_{i-1,i-k}^*, \ldots\ldots\ldots, \\ D\hat{x}_{\mathbf{i}-k}^*, \ldots\ldots\ldots \rho x_{i-k+1,i-k} \cdot \\ \cdot K\hat{x}_{i-k,\mathbf{i}-r+1}^* \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Kx_{i,i-r+1}, K\hat{x}_{i-1,\mathbf{i}-r+\mathbf{1}}^*, \ldots\ldots\ldots, \\ K\hat{x}_{i-k,\mathbf{i}-r+1}^*, \ldots\ldots\ldots\ldots D\hat{x}_{i-r+1}^* \end{matrix} \right\| \tag{11}$$

$$\mathbf{Kz1}_i = \left\| \begin{matrix} Dy_i, \ \rho x_{i,i-1} \cdot D\hat{x}_{i-1,i-1}^* + \rho h_{i,i-1} D_{\varepsilon_{i-1}^*}, .., \\ \rho x_{i,i-1} \cdot K\hat{x}_{i-1,i-k}^* + \rho h_{i,i-1} K_{\varepsilon_{i-1,i-k}^*}, .., \\ \rho x_{i,i-1} \cdot K\hat{x}_{i-1,k-r+1}^* + \rho h_{i,i-1} K_{\varepsilon_{i-1,i-r+1}^*} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \rho x_{i,i-1} \cdot K\hat{x}_{i-k,i-1}^* + \rho h_{i,i-k} K_{\varepsilon_{i-k,i-1}^*}, \\ D\hat{x}_{i-k,i-1}^*, \ldots\ldots\ldots, D\hat{x}_{\mathbf{i}-k}^* \ldots\ldots \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, K\hat{x}_{i-k,\mathbf{i}-r+1}^* \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \rho x_{i,i-1} \cdot K\hat{x}_{i-r+1,k-1}^* + \rho h_{i,i-1} K_{\varepsilon_{i-r+1,i-1}^*}, \\ K\hat{x}_{i-r+1,\mathbf{i}-1}^*, \ldots\ldots\ldots, K\hat{x}_{i-r+1,\mathbf{i}-k}^*, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots, D\hat{x}_{i-r+1}^* \end{matrix} \right\| \tag{12}$$

здесь $D\hat{x}_{i\text{-}k}^*$ и D_{y_i} – дисперсии оптимальной оценки и результата измерения соответственно; $K\hat{x}_{i-k,i-1}^*$ – корреляционный момент оптимальной оценки; $D_{\varepsilon_{i-1}^*}$ и $K_{\varepsilon_{i-k,i-1}^*}$ – дисперсия ошибки оптимальной оценки и корреляционный момент ошибок оптимальных оценок соответственно.

Математическое описание финитно-временного метода фильтрации без обратной связи

Модель измерения размерности $n{\cdot}k{\times}1$ определяется в виде [4]:

$$Y1_i = R_i X1_i + H1_i, \tag{13}$$

где $Y1_i = \left|Y_i, Y_{i-1}, ..., Y_{i-k+1}\right|^T$ – вектор размерности $n{\cdot}k{\times}1$, $X1_i = \left|X_i, X_{i-1}, ..., X_{i-k+1}\right|^T$, $H1_i = \left|H_i, H_{i-1}, ..., H_{i-k+1}\right|^T$ – векторы размерности $m{\cdot}k{\times}1$ и $n{\cdot}k{\times}1$ соответственно, R_i – блочная матрица размерности $n{\cdot}k{\times}m{\cdot}k$.

Оптимальная оценка полезного сигнала $\hat{X}1_i^*$, размерности $m{\cdot}k{\times}1$, определим в виде:

$$\hat{X}1_i^* = A_i^* \cdot Y1_i + XH1_i, \qquad (14)$$

где A_i^* – матрица коэффициентов оптимальной оценки сигнала $X1_i$, размерности $m{\cdot}k{\times}n{\cdot}k$, определяемая следующим соотношением:

$$A_i^* = Kx1y1_i \times Ky1_i^{-1}, \qquad (15)$$

где $Kx1y1_i$ – матрица взаимных корреляционных моментов оцениваемого и наблюдаемого сигналов, размерности $m{\cdot}k{\times}n{\cdot}k$; $Ky1_i$ – матрица взаимных и автокорреляционных моментов оцениваемого и наблюдаемого сигналов, размерности $m{\times}n$.

Сравнительный анализ финитно-временного метода обработки с обратной и без обратной связи

В данном разделе проведем сравнительный анализ двух методов обработки с обратной и без обратной связи по показателям точности, робастности и помехозащищенности. Сравнительный анализ рассмотрим на примере следующей модели измерения: $Y_i = X_i + H_i$, $i = 1, 2, \ldots, n$, где Y_i, X_i и H_i – стационарные, гауссовские, эргодические, центрированные, случайные процессы. Исходные данные для моделирования следующие: корреляционная функция полезного сигнала: $KX(\tau) = \sigma X^2 \cdot e^{-\alpha X|\tau|}$; вид погрешности – белый, стационарный, гауссовский шум; корреляционная функция погрешности измерения: $KH(\tau) = \sigma H^2 \cdot \delta_{i,j}$, где $i, j = 0,1$; среднеквадратическое отклонение: $\sigma = 1\frac{1}{c^2}$; параметры робастности и помехозащищенности: $\alpha = 0,1\frac{1}{c}$; $\alpha 1 = 0,1\frac{1}{c}$; используемая память фильтра финитно-временной обработки: $r = 4$; дискрет: $d = 2,4$ с.; объем выборки: $N = 5000$.

Моделирование исследуемых оптимальных методов финитно-временной обработки с и без обратной связи, и сравнительный анализ полученных оптимальных оценок сигналов были проведены в компьютерном математическом пакете MathCad [6].

В результате моделирования исследуемых финитно-временных методов обработки информации, после окончания переходного процесса были получены следующие статистические оценки дисперсией, характеризующие точность финитно-временной обработки без обратной связи (ФВО) и финитно-временной обработки с обратной связью (ФВОсОС) соответственно:

$$Dwef1_N = 0,389;\ DwefN2_N = 0,371,$$

где $Dwef1_N$ – дисперсия ошибки оценки ФВО полезного сигнала; $DwefN2_N$ – дисперсия ошибки оценки ФВОсОС полезного сигнала.

В результате моделирования получена зависимость изменения статистических дисперсий ошибок оценок рассматриваемых методов обработки измерительной информации от параметра r (рис. 1):

Как видно из рисунка, с увеличением параметра r, точность двух методов обработки увеличивается, при этом точность финитно-временной обработки без обратной связи асимптотически приближается к точности обработки с обратной связью.

Проведем сравнение по робастности по следующим параметрам: r, d, α, s, SIG0, SIG1. Для этого запишем общее отношение для определения показателя робастности [3]. Робастность модели определяется коэффициентом робастности $K_р$:

$$K_р = \frac{\left|\frac{\Delta D_{\varepsilon 0}}{D_{\varepsilon 0}}\right|}{\left|\frac{\Delta p_ф}{p_ф}\right|}, \qquad (16)$$

где $\Delta p_ф$ – изменение параметра фильтра по сравнению с оптимальным значением $p_ф$, которое вызывает изменение дисперсии ошибки оценки рассматриваемой моделью $\Delta D_{\varepsilon 0}$.

Примем изменения параметра робастности равным ±10%. Тогда при увеличении параметра робастности на 10% коэффициент $K_р$ будет правосторонней робастностью, а при таком же уменьшении параметра – левосторонней робастностью. Систему можно назвать робастной по параметру $p_ф$, если оба коэффициента ро-

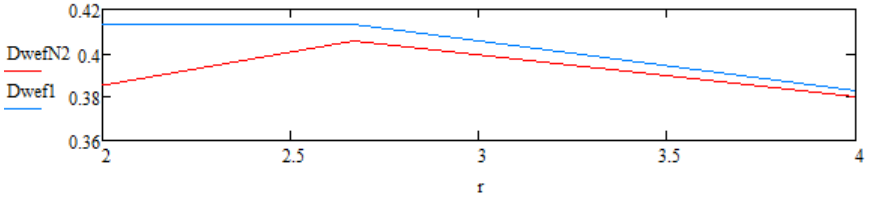


Рис. 1. График зависимости изменения дисперсии ошибки оценки ФВОсОС и ФВО от размера памяти

бастности (право- и левосторонние) окажутся меньше определенного значения, равного 0,3.

Определим робастность финитно-временной обработки (слева) и финитно-временной обработки с обратной связью (справа), в соответствии с формулой (16), по:

1. *Параметру памяти фильтра – r*:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}251;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}178$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}129;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}113.$$

2. *По параметру дискрета – d*:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}349;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}4$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}128;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}507.$$

3. *По параметру* – α:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}017;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}256$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}237;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}299.$$

4. *По параметру – s*:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}135;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}123$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}188;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}156.$$

5. *По параметру СКО ошибки* – SIG0:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}533;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}641$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 1{,}985;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 1{,}285.$$

6. *По параметру СКО полезного сигнала* – SIG1:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}433;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}414$$
$$\left|R_{pl\_}X\right| = 2{,}08;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 1{,}153.$$

Произведем сравнение по помехозащищенности по следующим параметрам: α1, SIG01, SIG11. Для этого также запишем общее отношением для определения показателя помехозащищенности [3]. Помехозащищенность модели оценивается коэффициентом помехозащищенности K_n:

$$K_n = \frac{\left|\frac{\Delta D_{\varepsilon o}}{D_{\varepsilon o}}\right|}{\left|\frac{\Delta b_n}{b_n}\right|}, \qquad (17)$$

где $\Delta D_{\varepsilon 0}$ – изменение дисперсии ошибки оценки, произошедшее из-за изменения Δb_n параметра помехи b_n.

Примем изменения параметра помехи равным ±10%. Тогда при увеличении параметра помехи на 10% коэффициент K_n будет правосторонней помехозащищенностью, а при таком же уменьшении параметра – левосторонней помехозащищенностью. Систему можно назвать помехозащищенной по параметру b_n, если оба коэффициента помехозащищенности (право- и левосторонние) окажутся меньше определенного значения, равного 0,3.

Определим помехозащищенность финитно-временной обработки (слева) и финитно-временной обработки с обратной связью (справа), в соответствии с формулой (17), по:

1. *По параметру* – α1:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}218;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}316$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}167;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}051.$$

2. *По параметру СКО ошибки* – SIG01:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 2{,}138;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 1{,}357$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}288;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}516.$$

3. *По параметру СКО полезного сигнала* – SIG11:

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}618;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}498$$

$$\left|R_{pl\_}X\right| = 0{,}629;\ \left|R_{mn\_}X\right| = 0{,}419.$$

Заключение

В данной работе были рассмотрены линейные, оптимальные по критерию среднего квадрата ошибки оценки финитно-временные методы обработки сигналов без и с обратной связью, которые являются более простыми по реализации и универсальными к виду помехи измерения по отношению к фильтру Калмана и Винера. После чего был проведен сравнительный анализ двух методов оценки сигнала по показателям точности, робастности и помехозащищенности.

Анализ результатов моделирования показывает, что с увеличением памяти устройства обработки r от 2 до 4, статистическая оценка точности финитно-временной обработки без обратной связи, выраженная в дисперсии ошибки оценки полезного сигнала, превосходит дисперсию ошибки оценки финитно-временной обработки с обратной связью, но асимптотически приближается к ней.

Финитно-временная обработка с обратной связью обладает робастностью по следующим

параметрам: по параметру r; по параметру d; по параметру α; по параметру s. При этом она показывает более высокую робастность по параметрам r, d, проигрывая обработке без обратной связи по параметрам α, s.

Финитно-временная обработка с обратной связью помехозащищена по следующим параметрам: по параметру $\alpha 1$; по параметру SIG01. При этом она показывает более высокую помехозащищенность по параметру $\alpha 1$, в сравнении с финитно-временной обработкой без обратной связи.

В дальнейшем будет проведен сравнительный анализ финитно-временной обработки с обратной связью с фильтрацией Калмана и со спектрально-финитной обработкой.

Библиографический список

1. *Сейдж Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управления. М.: Связь, 1976. 495 с.

2. *Медич Дж.* Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973. 440 с.

3. *Иванов Ю. П., Никитин В. Г.* Информационно-статистическая теория измерений. Методы оптимального синтеза информационно-измерительных, критерии оптимизации и свойства оценок: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2011. 102 с.

4. *Иванов Ю. П.* Финитно-временной метод оптимальной фильтрации дискретных сигналов // Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2018. № 5. С. 23–28.

5. *Иванов Ю. П.* Финитно-временной и спектрально-финитный методы оптимальной фильтрации дискретных сигналов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1 (53). С. 154–160.

6. *Новиковский Е. А.* Работа в системе MathCAD: учеб. пособие. Барнаул: Типография АлтГТУ, 2013. 114 с.

УДК 529.735.083 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-36-41**

Ю. П. Иванов*
кандидат технических наук, доцент
Д. Н. Семенов*
магистрант
Н. С. Красненков*
магистрант
А. В. Сорокина*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА И ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В данной работе проведено синтезирование и исследование универсального виртуального прибора, предназначенного для исследования различных систем технического обслуживания на основе использования графоаналитического подхода и моделей дискретных марковских процессов, описываемых дифференциальными уравнениями Колмогорова. Данный подход позволяет оценить показатели качества систем технического обслуживания, определяемые точностью работы систем, надежностью и организацией обслуживания технических систем. Виртуальный прибор дает возможность осуществить анализ подобных систем для широкого круга пользователей, даже не знакомых с применяемым математическим аппаратом.
Ключевые слова: *виртуальный прибор, замкнутый размеченный граф, система дифференциальных уравнений Колмогорова, пуассоновские процессы, марковские дискретные процессы, оценка показателей качества.*

Y. P. Ivanov*
PhD, Tech., Associate Professor
D. N. Semenov*
Postgraduate Student
N. S. Krasnenkov*
Postgraduate Student
A. V. Sorokina*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS MAINTENANCE BASED ON THE GRAPHOANALYTIC METHOD AND VIRTUAL DESIGN

In this paper, the synthesis and study of a universal virtual device designed for the study of various maintenance systems based on the use of a graphoanalytic approach and models of discrete Markov processes described by Kolmogorov differential equations are carried out. This approach makes it possible to evaluate the quality indicators of maintenance systems, determined by the accuracy of the systems, reliability and organization of maintenance of technical systems. The virtual device makes it possible to analyze such systems for a wide range of users who are not even familiar with the mathematical apparatus used.
Keywords: *virtual device, closed marked graph, Kolmogorov system of differential equations, Poisson processes, Markov discrete processes, evaluation of quality indicators.*

Рассматриваются существующие системы технического обслуживания, такие как подготовка приборного оборудования к полету и перед полетом, системы обеспечения безопасности полетов, оценка уровня радиоактивности в наблюдаемой зоне, системы медицинского обслуживания, позволяющие осуществить оценку работы врача, системы оценки качества и прогно-

зирования метеорологического состояния на основе полученных результатов измерений [1].

В таких задачах технического обслуживания требуется обеспечить эффективность этих систем по готовности их к работе, а также оценить качество работы используемой контрольной аппаратуры, что в конечном итоге определяет и экономическую эффективность этих систем.

Задача оценки и повышения эффективности технических систем требует использования специалистов как в области технического обслуживания информационно-измерительных приборов, так и в математике, что не всегда удается. В связи с этим предлагается разработать автоматическую систему, осуществляющую оценку таких процедур в виде виртуального прибора, т. е. автономного программного продукта, который сможет использовать широкий класс специалистов, не имеющих опыта работы в компьютерных математических пакетах, таких как MathCad, LabView, MatLab и т. д. для оценки их работы как участников систем массового обслуживания.

Такой автономный прибор должен базироваться на использовании замкнутого размеченного графа [2], где определяется количество несовместных состояний исследуемой системы [3]. Для осуществления синтеза и анализа выбираются показатели качества таких систем. Оценка качества основывается на рассмотрении пуассоновского потока [1] переходов рассматриваемой системы из одного состояния в другое.

В качестве модели систем технического обслуживания часто используются модели в виде дифференциальных уравнений Колмогорова [4] на основе дискретных марковских процессов.

Достаточно адекватным является анализ на основе марковских процессов, который позволяет провести синтез и анализ таких систем и исходных данных, которые характеризуют надежность, точность характеристик исследуемых измерительных систем, организацию обслуживания и т. д.

Для определения всех вероятностных характеристик необходимо составить систему прямых дифференциальных уравнений Колмогорова [4] и исследовать их в нестационарном режиме на основе уравнения (1).

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t), \qquad (1)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица инфинитезимальных вероятностей перехода заданной размерности $n \times n$, определяемой количеством исследуемых несовместных состояний; $\mathbf{P}(t)$ – вектор-столбец безусловных вероятностей, размерностью $n \times 1$. [4]

Для оценки влияния на показатели качества характеристик параметров системы технического обслуживания необходимо рассмотреть в стационарном режиме уравнение (1), заменив его уравнением (2). Для стационарного случая нужно составить систему линейных уравнений, которая получается путем замены производных в левых частях уравнений на ноль (2).

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} = 0. \qquad (2)$$

Система уравнений (1) описывает переходный процесс, но в силу того, что матрица А не зависит от t, существует стационарное состояние такой системы, нахождение системы в котором определяется соотношением (2).

Случайные процессы, описывающие такую систему, определяются пуассоновским потоком.

При анализе систем массового обслуживания [5] определяется количество несовместных состояний рассматриваемой системы, которую удобнее всего сделать на основе графоаналитического подхода [3].

Возьмем в качестве примера замкнутый полный граф, который отражает работу измерительной аппаратуры и ее технического обслуживания в процессе полета ЛА. Данный подход можно рассмотреть на примере 5-вершинного графа, который представлен на рис. 1.

Возможные состояния измерительной бортовой аппаратуры для графа 1 можно определить следующим образом:

Н1 – режим восстановления объекта контроля (ОК);

Н2 – состояние работоспособности ОК в режиме работы (полет);

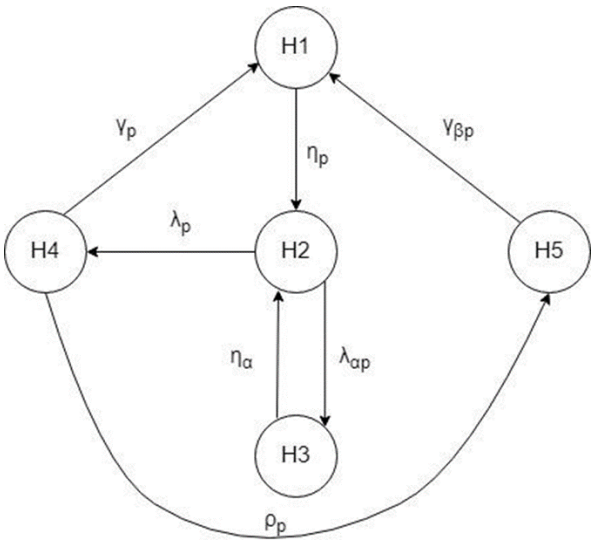


Рис. 1. Граф состояний объекта контроля

Н3 – состояние работоспособности в режиме работы, по результатам контроля принято решение о его неработоспособности;

Н4 – состояние неработоспособности ОК в режиме работы и принято решение о его неработоспособности;

Н5 – состояние неработоспособности ОК в режиме работы и по результатам контроля принято решение о его работоспособности.

Интенсивности переходов из состояния в состояние определены следующими значениями:

$\gamma_p = 1\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность перевода неисправных ОК (объектов контроля), находящихся в работе, в режим восстановления;

$\gamma_{\beta p} = 0{,}1\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность перевода неисправных ОК, находящихся в процессе работы, и состояния которых системой контроля было принято исправным, в режим восстановления;

$\eta_p = 10\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность восстановления неисправных ОК и СК (систем контроля) для использования в режимах работы;

$\eta_\alpha = 0{,}1\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность возврата ложно забракованных исправных ОК в режим работы или покоя;

$\lambda_p = 10^{-2}\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность отказов ОК в режиме работы;

$\lambda_{\alpha p} = 10^{-3}\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность перевода исправных ОК, находящихся в режиме работы, в режим восстановления;

$\rho_p = 10^{-4}\frac{1}{\text{час}}$ – интенсивность ложных обнаружений исправности ОК в режиме работы;

$t_{\max} = 250$ ч – время наблюдения.

Система массового обслуживания, определяемая графом на рис. 1, может быть описана системой дифференциальных уравнений Колмогорова следующего вида:

$$\frac{d}{dt}P_1(t) = -(\eta p)\cdot P_1(t) + \gamma p\cdot P_4(t) + \gamma\beta p\cdot P_5(t)$$

$$\frac{d}{dt}P_2(t) = \eta p\cdot P_1(t) - (\lambda p + \lambda\alpha p)\cdot P_2(t) + \eta\alpha\cdot P_3(t)$$

$$\frac{d}{dt}P_3(t) = \lambda\alpha p\cdot P_2(t) - (\eta\alpha)\cdot P_3(t) \qquad (3)$$

$$\frac{d}{dt}P_4(t) = \lambda p\cdot P_2(t) - (\gamma p + \rho p)\cdot P_4(t)$$

$$\frac{d}{dt}P_5(t) = \rho p\cdot P_4(t) - \gamma\beta\rho\cdot P_5(t)$$

Начальные условия для решения системы дифференциальных уравнений задаем в следующем виде: $P1(0) = 0$ $P2(0) = 1$ $P3(0) = 0$ $P4(0) = 0$ $P5(0) = 0$

Приведенная система дифференциальных уравнений позволяет оценить вероятность нахождения системы в каждом состоянии и оценить, какие параметры наиболее сильно влияют на показатели качества (достоверность, готовность) [2].

Система алгебраических уравнений, определяющих вероятности состояний $P_i(i = 1..5)$, определяющих состояние исследуемой системы в стационарном режиме, на основании уравнения (2) определяется следующими соотношениями:

$$0 = -(\eta p)\cdot P_1(t) + \gamma p\cdot P_4(t) + \gamma\beta p\cdot P_5(t)$$

$$0 = \eta p\cdot P_1(t) - (\lambda p + \lambda\alpha p)\cdot P_2(t) + \eta\alpha\cdot P_3(t)$$

$$0 = \lambda\alpha p\cdot P_2(t) - (\eta\alpha)\cdot P_3(t) \qquad (4)$$

$$0 = \lambda p\cdot P_2(t) - (\gamma p + \rho p)\cdot P_4(t)$$

$$0 = \rho p\cdot P_4(t) - \gamma\beta\rho\cdot P_5(t)$$

Для решения системы уравнений (4) необходимо заменить любое из этих уравнений условием нормировки $\sum_{i=1}^{5} P_i = 1$.

При исследовании такой системы технического обслуживания летательного аппарата в процессе его полета выберем следующие показатели качества: достоверность канала «годен» $D_0(t)$; достоверность канала «негоден» $D_1(t)$; безусловный риск изготовителя $\alpha(t)$; безусловный риск заказчика $\beta(t)$; функция готовности системы $k_p(t)$.

Таким образом, по результатам моделирования 5-вершинного графа имеем следующие уравнения, а также полученные результаты:

$$D_0(t) = \frac{P_2(t)}{P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t)}$$

$$D_1(t) = \frac{P_4(t)}{P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t)}$$

$$\alpha(t) = \frac{P_3(t)}{P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t)} \quad (5)$$

$$\beta(t) = \frac{P_5(t)}{P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t)}$$

$$k_p(t) = P_2(t) \quad (6)$$

В результате моделирования такой системы в программе MathCad на момент времени $t = 250$ ч были получены следующие показатели качества:

$D_0(t_{\max}) = 0{,}989$ – достоверность канала «годен»; $D_1(t_{\max}) = 9{,}89 \cdot 10^{-3}$ – достоверность канала «негоден»; $\alpha(t_{\max}) = 9{,}891 \cdot 10^{-4}$ – безусловный риск изготовителя; $\beta(t_{\max}) = 9{,}89 \cdot 10^{-6}$ – безусловный риск заказчика; $k_p(t_{\max}) = 0{,}983$ – готовность системы.

При $t = \infty$ получим показатели качества, определяющие решения уравнения (5), где

$$D_0(t) + D_1(t) + \alpha(t) + \beta(t) = 1$$

$D_0(t_{\max}) = 0{,}99$ – достоверность канала «годен»; $D_1(t_{\max}) = 9{,}76 \cdot 10^{-3}$ – достоверность канала «негоден»; $\alpha(t_{\max}) = 2{,}3014 \cdot 10^{-4}$ – безусловный риск изготовителя; $\beta(t_{\max}) = 9{,}86 \cdot 10^{-6}$ – безусловный риск заказчика; $k_p(t_{\max}) = 0{,}98$ – готовность системы.

Анализ такой системы позволяет оценить возможности предлагаемого виртуального прибора для оценки показателей качества различных систем технического обслуживания, указанных выше с целью сравнения полученных значений с требуемыми значениями и наметить пути повышения показателей качества путем изменения исходных интенсивностей переходов.

Моделирование виртуального прибора

Используя изложенный выше математический аппарат построения 5-вершинного графа, был создан универсальный прибор, позволяющий в автоматическом режиме решать задачу оценки различных параметров технической системы с n-м количеством вершин.

В основу создания графического интерфейса и внутренней архитектуры легли следующие программные пакеты: PyQt5 – версия Qt фреймворка для языка Python; библиотека Numpy; библиотека SymPy для работы с выражениями в символьной форме, а также некоторые другие [6].

Порядок работы пользователя в программе:

– пользователь строит граф в программе, указывает значения интенсивностей переходов на ребрах графа и вводит начальные условия;

– программа самостоятельно по графу определяет его матрицу смежности;

– по матрице смежности формируются системы уравнений по методу, описанному далее;

– программа решает систему дифференциальных уравнений и систему линейных уравнений (для стационарного случая);

– в отдельных окнах пользователь может вывести полученные матрицы смежности, системы уравнений и графики.

Программа предусматривает до девяти вершин графа.

Алгоритм получения системы уравнений выглядит следующим образом:

1. Число уравнений равно количеству строк (столбцов матрицы).

2. Для составления i-го уравнения рассматриваются i-е строка и столбец матрицы.

3. i-я строка отражает то, в какие узлы осуществляется переход из i-го узла графа, значение же соответствующего элемента равно величине плотности потока событий, переводящего систему по данной стрелке (весу ребра графа).

4. i-й столбец отражает то, из каких узлов осуществляется переход в i-й узел.

Так как правило составления данной системы дифференциальных уравнений гласит, что, если стрелка ведет в данное состояние, член имеет знак плюс; если ведет из данного состояния – знак минус.

Таким образом, сначала программа осуществляет перебор строк матрицы, тогда в i-е уравнение пойдут члены со знаком минус, равные произведению значения интенсивности, стоящей в j-м столбце на вероятность i-го события.

Далее осуществляется перебор столбцов матрицы, тогда в i-е уравнение пойдут члены со знаком плюс, равные произведению значения интенсивности, стоящей в j-й строке на вероятность j-го события.

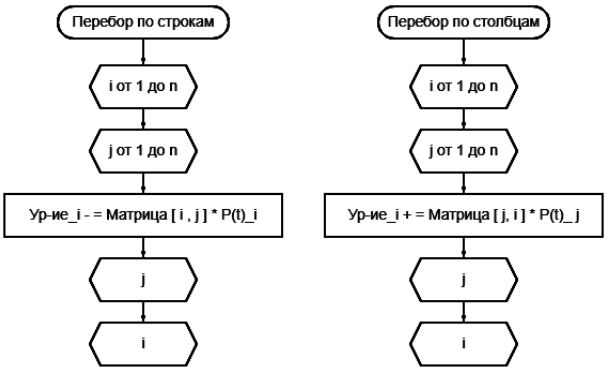


Рис. 2. Составление системы ОДУ для вывода

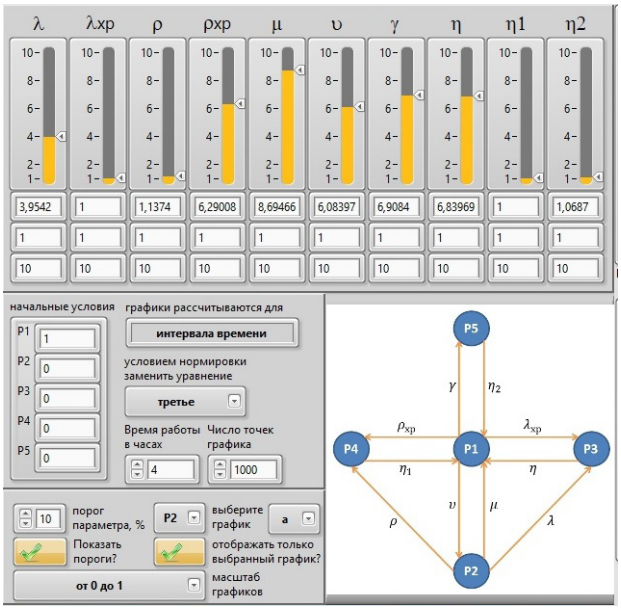


Рис. 3. Окно программы с введенными данными

Таким образом, выходной результат для решения примера, приведенного в предыдущем разделе, будет иметь следующий вид: окно программы данных (рис. 3); графики функции вероятностей (рис. 4); графики достоверностей и рисков (рис. 5).

В дальнейшем в программу будет добавлена возможность расчета устойчивости системы от параметра, выбранного пользователем.

В данной работе был спроектирован виртуальный прибор, который обеспечивает решение задач для широкого круга потребителей в различных сферах деятельности, где не требуется знание высшей математики, а лишь будет использоваться прибор, который будет автоматически решать эти задачи.

Виртуальный прибор был разработан на основе языка программирования Python путем использования метода составления графа любой размерности, в котором производится решение дифференциальных уравнений, а также

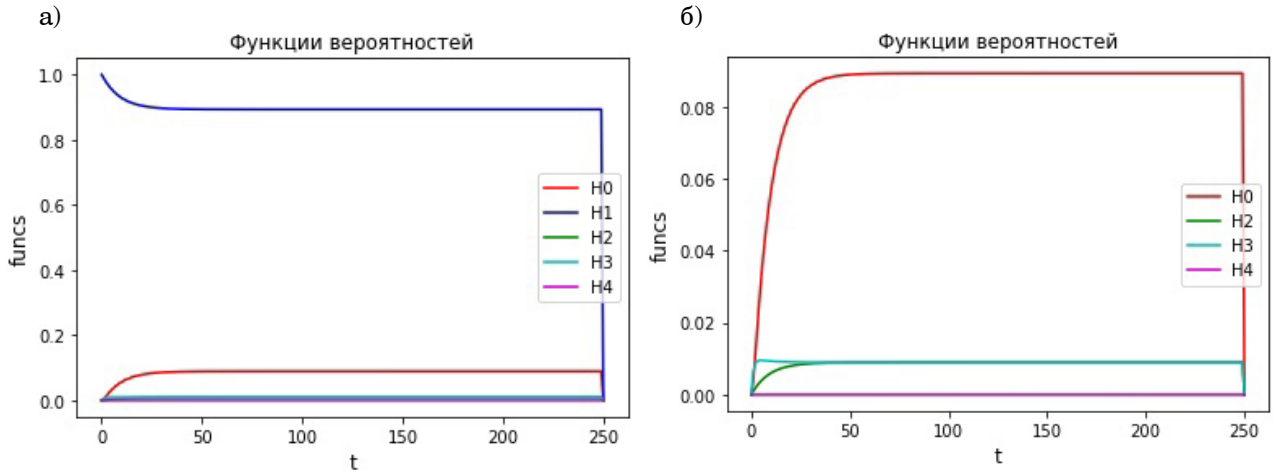


Рис. 4. Функции вероятностей для 5-вершинного графа состояний: а – для всех состояний; б – в приближении

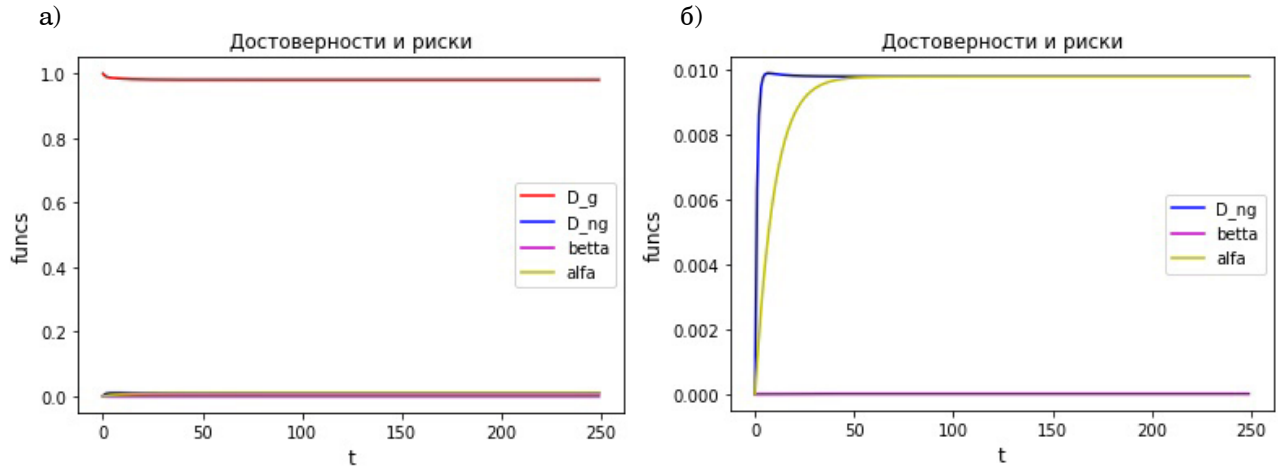


Рис. 5. Достоверности и риски для 5-вершинного графа состояний: а – для всех состояний; б – в приближении

линейных уравнений, после чего идет построение графиков оценки точностных параметров систем, таких как точность, надежность, время обслуживания и т. д.

Библиографический список

1. *Пловко А. М.* Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 446 с.

2. *Иванов Ю. П., Никитин В. Г., Тихомиров М. Е.* Контроль и диагностика авионики: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2020. 127 с.

3. *Иванов Ю. П., Никитин В. Г., Чернов В. Ю.* Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2004. 98 с.: ил.

4. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.: ил.

5. *Саати Т. Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Пер. с англ. Е. Г. Коваленко, ред. И. Н. Коваленко, Р. Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.

6. *Swaroop C. H.* A Byte of Python (Russian): ebshelf Inc / Пер. Владимир Смоляр, 2013. 159 с.

УДК 004.627

Д. А. Казаков*
магистрант
Р. Н. Малаханов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА

Статья описывает процесс определения оптимального количества коэффициентов, необходимых для кодирования фрагментов речи с целью осуществления синтеза речевого сигнала методом линейного предсказания. Дается общее описание программной реализации метода линейного предсказания, приводятся результаты, полученные на основе изучения базы образцов речи разных дикторов.
Ключевые слова: *линейное предсказание, коэффициенты линейного предсказания, синтез речи, обработка речевого сигнала.*

D. A. Kazakov*
Postgraduate Student
R. N. Malakhanov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DETERMINING THE OPTIMAL NUMBER OF LINEAR PREDICTION COEFFICIENTS FOR SPEECH SIGNAL FRAGMENTS ENCODING

The article describes the process of determining the optimal number of coefficients needed to encode the language fragments in order to synthesize a speech signal using the linear prediction method. It is given the general description of the software implementation of linear prediction method, and it is presented the results obtained by researching the base of speech samples of several speakers.
Keywords: *linear prediction, linear prediction coefficients, speech synthesis, speech signal processing.*

При разработке автономной системы синтеза речи на базе микроконтроллера одной из основных проблем является ограниченный объем памяти, необходимый для хранения оцифрованных сегментов записанной речи диктора. Для экономии памяти применяется метод линейного предсказания, который позволяет значительно сократить размер сегментов речи за счет кодирования весовыми коэффициентами. Однако, возникает проблема вычислительной нагрузки, на которую влияет количество коэффициентов линейного предсказания. От количества коэффициентов также зависит качество синтезируемой речи, поэтому необходимо определить такое количество, при котором обеспечивается приемлемая разборчивость синтезируемой речи и небольшой объем вычислений.

В проведенном исследовании расчет и моделирование линейного предсказания осуществлялись с помощью программы, написанной на языке программирования Python с использованием функций библиотек numpy, librosa, scipy, sounddevice и matplotlib. Аудиоматериалы для исследования брались из сформированной базы аудиозаписей фонем, сочетаний фонем и слов русского языка. В записи участвовало 14 дикторов: 8 мужчин и 6 женщин. Каждая фонема записывалась 10 раз.

Алгоритм программы можно разделить на два подалгоритма: первый осуществляет расчет коэффициентов линейного предсказания, второй синтезирует по рассчитанным коэффициентам речевой фрагмент.

По своей природе речевой сигнал является нестационарным. На рис. 1 приведены фрагменты речевого сигнала фонемы «а» диктора – мужчины и диктора – женщины на одинаковом интервале времени. На данном интервале ча-

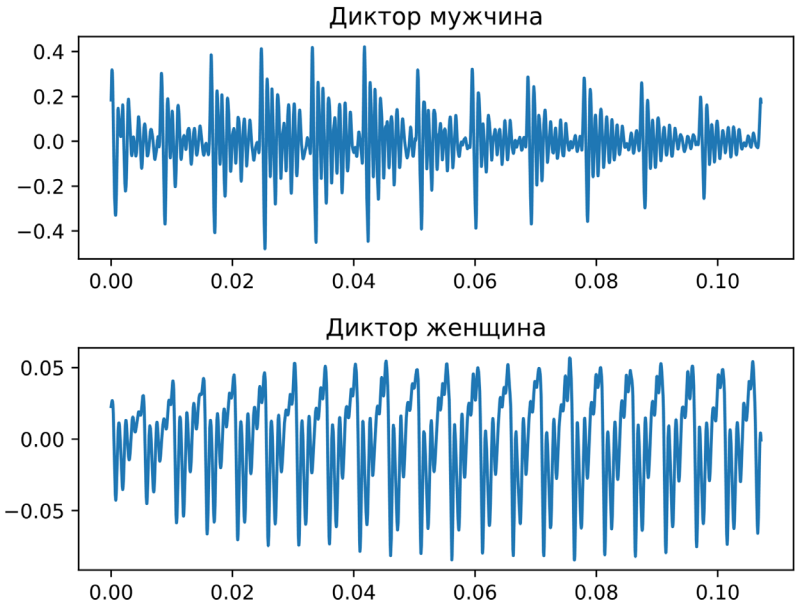


Рис. 1. Фрагмент речевого сигнала фонемы «а» диктора – мужчины и диктора – женщины

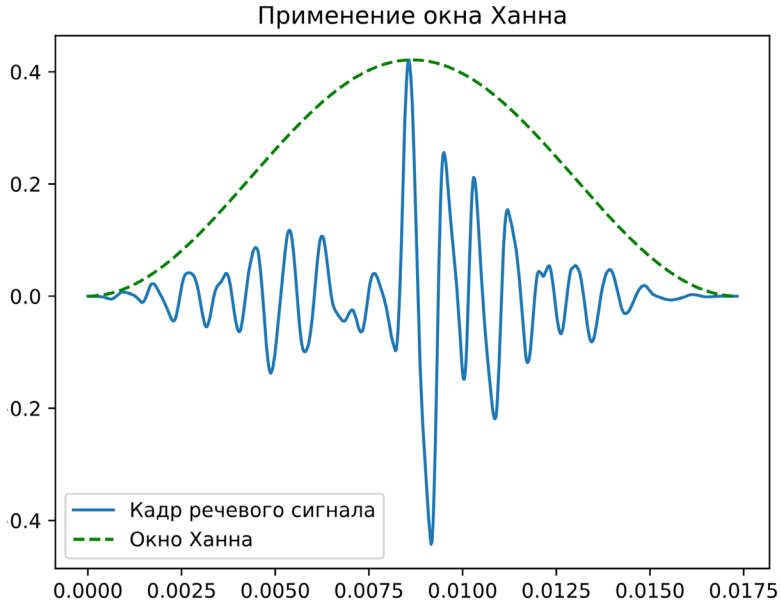


Рис. 2. Выделение кадра из записи фонемы «а» диктора – мужчины с помощью окна Ханна

стота основного тона диктора – мужчины принимает два значения: 123.5 Гц и 121.7 Гц, а частота основного тона диктора – женщины изменяет в пределах от 199 Гц до 195.3 Гц.

Для применения линейного предсказания сигнал должен быть стационарным, поэтому он разбивается в соответствии с методом PSOLA [1] на перекрывающиеся между собой кадры, внутри которых, в силу их небольшой длины обеспечивается квазистационарность [2]. Каждый кадр формируется тремя максимумами речевого сигнала и охватывает два соседних периода основного тона. Взаимное перекрытие кадров в таком случае равно, соответственно, одному периоду основного тона. Для разбиения сигнала на кадры применяется окно Ханна, взвешивающее дискретные значения речевого сигнала на заданном интервале и обнуляющее их за пределами, как показано на рис. 2.

Для расчета коэффициентов предсказания берется один кадр сигнала, выделяющий максимальное значение амплитуды. По массиву

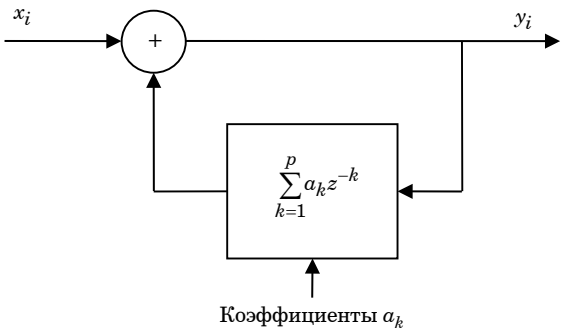


Рис. 3. Структурная схема синтезатора на основе линейного предсказания

дискретных значений этого кадра функция librosa.lpc оценивает коэффициенты линейного фильтра с заданным порядком, используя метод Берга, который является расширением подхода Юла-Уокера (оценки параметров линейного предсказания с помощью автокорреляции).

Таким образом формируется база коэффициентов предсказания для каждой фонемы и сочетания фонем. Из этой базы при синтезе речевого сигнала требуемые коэффициенты извлекаются и подаются на показанный на рис. 3 линейный фильтр p-го порядка для определения его свойств в момент синтеза конкретной фонемы или сочетания фонем. Получается, что общий спектр, обусловленный излучением звуков, речевым трактом и формой возбуждающих импульсов, описывается с помощью линейной системы p-го порядка с изменяющимися во времени параметрами и передаточной функцией [3]:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1 - \sum_{k=1}^{p} a_k z^{-k}}. \quad (1)$$

Порядок системы (фильтра) p определяется количеством коэффициентов. На вход фильтра поступает кадр исходного сигнала, представляющий собой массив взвешенных дискретных значений x_i. На выходе получается массив дискретных значений y_i, который является синтезированным кадром. Готовые кадры, в соответствии с алгоритмом PSOLA, складываются с перекрытием, формируя итоговый сигнал.

Для реализации фильтра в программе используется формула 2, которая логически вытекает из передаточной функции $H(z)$ и с помощью которой рассчитывается предсказанное дискретное значение речевого сигнала y_i. Можно сказать, что в основе метода линейного предсказания лежит авторегрессионная модель, в которой текущий отсчет речевого сигнала аппроксимируется суммой взвешенных значений предшествующих отсчетов и значения сигнала возбуждения [3, 4].

$$y_i = x_i + \sum_{k=1}^{p} a_k y_{i-k}, \quad (2)$$

где y_i – текущее дискретное значение предсказания речевого сигнала; y_{i-k} – предшествующие дискретные значения предсказания; a_k – коэффициенты линейного предсказания; x_i – значение сигнала возбуждения, в роли которого вы-

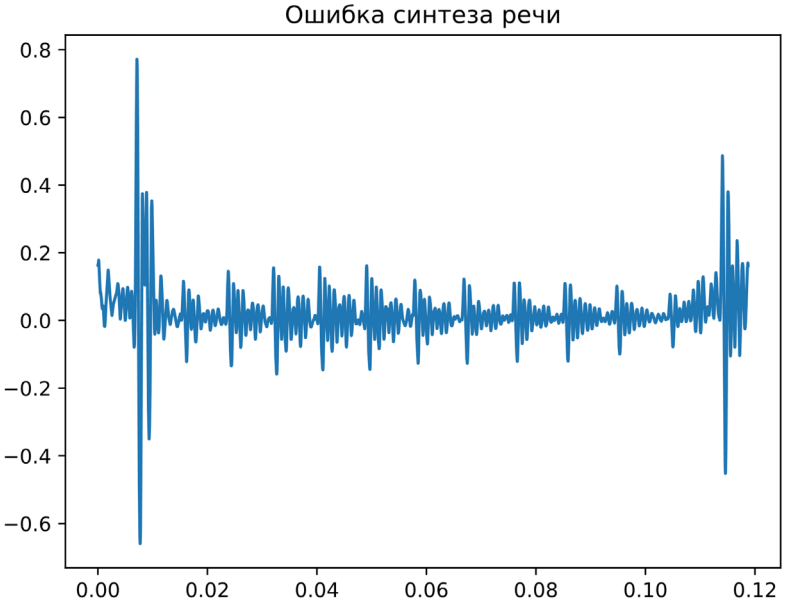


Рис. 4. Ошибка при синтезе 11 кадров фонемы «а» диктора – мужчины методом линейного предсказания

ступают взвешенные дискретные значения исходного речевого сигнала; p – количество коэффициентов предсказания.

В соответствии с формулой (2) для воспроизведения отсчета y_i требуется произвести p умножений и p сложений [3].

На рис. 4 приведен график ошибки синтеза 11 кадров речевого сигнала, рассчитанной как разность исходного сигнала и синтезированного. На вход линейного фильтра подаются кадры исходного сигнала, которые из-за нестационарности имеют разную длительность. Дискретные значения внутри кадров нормированы. Количество коэффициентов, равное 15, остается постоянным. Значения коэффициентов также не меняются и соответствуют полученным для одного кадра.

Рассматриваемая запись фонемы «а» состоит из 23040 дискретных значений, которые представлены в формате float и занимают в памяти 32 бита или 4 байта каждый. Экономия памяти достигается за счет использование одного кадра, который в данном случае состоит из 765 дискретных значений формата float и определенным количеством коэффициентов.

Оценка количества коэффициентов, при котором обеспечивается приемлемая разборчивость осуществляется прослушиванием синтезируемой речи. Результаты оценки для фонем «а», «и», «о», «у», «ы», «э» приведены в табл. 1–6.

Помимо существенного сокращения объема памяти, необходимой для хранения единиц речи, основными достоинствами метода линейного предсказания являются простота реализации, относительно небольшой объем исходного речевого материала, а также отсутствие разрывов при соединении кадров, снижающих каче-

Таблица 1

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «а»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	5	3	3	3	3	5	3	6
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5			
Количество коэффициентов	3	5	4	3	3			

Таблица 2

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «и»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	3	3	3	3	3	3	3	3
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6		
Количество коэффициентов	3	3	4	3	3	5		

Таблица 3

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «о»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	3	3	3	6	3	5	3	3
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6		
Количество коэффициентов	3	3	3	3	3	3		

Таблица 4

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «у»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	3	3	5	3	3	3	3	3
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6		
Количество коэффициентов	3	3	3	3	3	3		

Таблица 5

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «ы»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	3	3	3	3	3	5	3	3
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6		
Количество коэффициентов	3	3	5	3	3	4		

Таблица 6

Количество коэффициенты предсказания для фонемы «э»

Диктор мужского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6	Диктор 7	Диктор 8
Количество коэффициентов	3	3	3	3	3	5	5	3
Диктор женского пола	Диктор 1	Диктор 2	Диктор 3	Диктор 4	Диктор 5	Диктор 6		
Количество коэффициентов	3	3	3	3	5	4		

ство конечного синтезируемого речевого сигнала. Однако качество синтезируемой речи значительно зависит от количества коэффициентов a_k и точности их вычисления [2, 3].

Библиографический список

1. Pitch-Synchoronous Overlap-Add (PSOLA)/Tom Bäckström, Okko Räsänen, Abraham Zewoudie, Pablo Pérez Zarazaga, Liisa Koivusalo, Sneha Das, Esteban Gómez Mellado, Mariem Bouafif Mansali, Daniel Ramos. URL: https://speechprocessingbook.aalto.fi/Representations/Pitch-Synchoronous_Overlap-Add_PSOLA.html?highlight=psola (дата обращения: 03.12.2022).

2. *Рыбин С. В.* Синтез речи: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2014. 92 с.

3. *Рабинер Л. Р., Шафер Р. В.* Цифровая обработка речевых сигналов. М.: Радио и связь, 1981. 495 с.

4. *Сорокин В. Н.* Синтез речи. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. 392 с.

УДК 621.396.967:621.396.969.14:629.7.05 DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-47-53

В. Н. Коврегин*
кандидат технических наук, доцент
Г. М. Коврегина*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ СБЛИЖЕНИЯ/УДАЛЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО НЕОДНОЗНАЧНЫМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЭХО-СИГНАЛА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Представляется нетрадиционный метод определения дальности/скорости при всеракурсном наблюдении радаром малоскоростного/зависшего воздушного объекта на основе интегрированной обработки неоднозначных частотно-временных измерений бинарных эхосигналов квазинепрерывного излучения с линейной частотной модуляцией несущей волны.
Ключевые слова: *импульсно-доплеровский радиолокатор, линейная частотная модуляция, неоднозначные частотно-временные измерения, малоскоростной объект.*

V. N. Kovregin*
PhD, Tech., Associate Professor
G. M. Kovregina*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospase Instrumentation*

METHOD FOR DETERMINING THE DISTANCE AND SPEED OF APPROACHING/REMOVING AN OBJECT FROM AMBIGUOUS TIME-FREQUENCY MEASUREMENT OF THE ECHO SIGNAL OF QUASI-CONTINUOUS CHIRP RADIATION

An unconventional method for determining the range/velocity for long-range all-aspect radar observation of a low-speed air object is presented based on the integrated processing of ambiguous time-frequency measurements of binary echo signals of quasi-continuous radiation with linear frequency modulation of the carrier wave.
Keywords: *pulse-Doppler radar, linear frequency modulation, ambiguous time-frequency measurements, low-velocity object.*

Введение

В импульсно-доплеровских радах (РЛС) различного базирования в задачах дальнего наблюдения воздушных объектов (ВО) – обнаружения/измерения траекторных параметров – традиционно используется квазинепрерывное излучение (КНИ) с высокой/средневысокой частотой повторения коротких импульсов (ЧПИ) [1–3]. Применение КНИ ориентировано для наблюдения объекта при высокой скорости сближения, непосредственно определяемой по однозначному измерению доплеровской частоты (ДЧ) эхо-сигнала. При этом «раскрытие» «слепых» зон и однозначное определение дальности по измерениям неоднозначной задержки сигнала (НЗС) традиционно базируется на вариациях ЧПИ/периода повторения импульсов (ППИ), осуществляемых их программным перебором и/или на основе адаптивного управления [4–7 и др.]. Наряду с ограничениями по скорости, в ряде приложений КНИ актуальна проблема повышения оперативности/точности сеанса наблюдения. Для дальнего всеракурсного наблюдения, инвариантного к скорости сближения/удаления объекта – включая традиционно «слепые» скорости при зависании ВО, при околонулевой/малой радиальной составляющей – применимы методы, реализуемые в унифицированном режиме излучения бинарных пачек

КНИ при инвертируемой линейной частотной модуляции несущего колебания (ЛЧМ) [8, 9 и др.]. Такие методы практически «всескоростные», менее критичны по оперативности, но при этом сохраняет актуальность ряд задач повышения оперативности/точности измерений траекторных параметров ВО.

В настоящее время ввиду интенсивного развития «малой авиации» и беспилотных летательных аппаратов, возрастает практическая значимость решения ряда проблемных задач, связанных с методическим обеспечением всеракурсного дальнего высокоточного наблюдения именно таких ВО, для которых типичны традиционно «слепые скорости» сближения/удаления на фоне мешающих отражений от земли (МОЗ) при КНИ. Для таких объектов ряд известных способов определения дальности/скорости по частотным, временным измерениям и при их комбинации во многих случаях неприменимы или же не удовлетворяют современным требованиям по точности и/или оперативности. Цель данной работы – нетрадиционное методическое обеспечение для определения дальности и скорости сближения/удаления по неоднозначным частотно-временным измерениям (НЧВИ) сигналов малоскоростного ВО на фоне МОЗ при бинарных пачках КНИ с инвертируемой ЛЧМ, позволяющее в рамках типового сеанса наблюдения ВО существенное повысить точность/оперативность измерений траекторных параметров.

Постановка задачи

Радар осуществляет обзор окологоризонтного пространства в верхней полусфере. На рис. 1 в упрощенном виде показана угломестная ориентация главного луча (ГЛ) типовой диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС, в котором с превышением над РЛС по высоте находится ВО, и боковых лепестков (БЛ) ДНА, направленных вниз и формирующих мощные МОЗ. Объект – «зависшая» или движущаяся с относительно малой скоростью сближения/удаления типичная «точечная» радиолокационная воздушная цель – с «узким» спектром сигнала, который: при традиционном КНИ попадает в спектральную зону МОЗ по БЛ и, как следствие, не детектируется; при КНИ с ЛЧМ обнаруживается в одном из дискретов дальности (НЗС) в рабочей зоне ППИ и в номере частотного фильтра по шкале ЧПИ, соответствующем дальномерно-доплеровской частоте (ДДЧ) сигнала ВО (рис. 2).

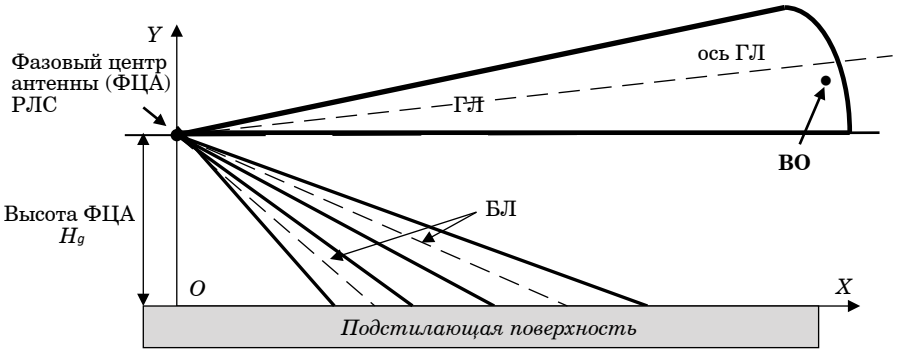


Рис. 1. Типичный вид ориентация ГЛ и БЛ в плоскость OXY нормальной земной системы координат

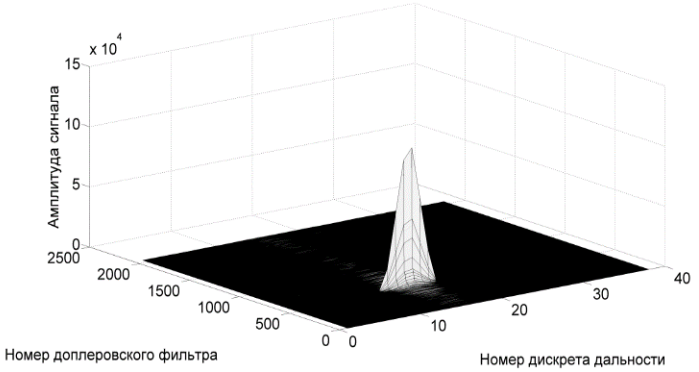


Рис. 2. Обнаружение/измерение эхосигнала ВО при ЛЧМ-излучении в дискретах НЗС и ДДЧ

Объект находится на дальности R_{ob} в диапазоне $[R_{d\,\min}; R_{d\,\max}]$, где $R_{d\,\min}$ и $R_{d\,\max}$ – ограничения по минимальной и максимальной дальности обнаружения ВО, потенциально обеспечиваемой РЛС в исследуемом режиме «КНИ-ЛЧМ».

В рамках сеанса наблюдения ВО этап раскрытия «слепых» дальностей/ обнаружения/ первичного измерения выполняется известными способами [2–3, 5, 7–10 и др.], в общем случае, при нескольких ЧПИ (F_r)/ППИ (T_r), причем при каждом задействованном на этом этапе значении F_r/T_r излучаются бинарные ЛЧМ-пачки – с инвертируемым знаком скорости изменения S_{LFM} несущей частоты f_0 в задающем ЛЧМ генераторе. Исходно полагается, что в результате этого (0)-шага обнаружение/первичное дискретное НЧВИ происходит по каждой j-ой ЛЧМ-пачке (j = 1, 2). После типичной обработки принимаемых ЛЧМ-сигналов, с учетом дискретизации измерений ДДЧ, НЗС и отношений «сигнал/шум», определены континуальные оценки ДДЧ ($F_{RD\,j\,(0)}$, $F_{RD\,j+1\,(0)}$) и НЗС ($\tau_{ASD\,j\,(0)}$, $\tau_{ASD\,j+1\,(0)}$), рассчитаны дисперсии / среднеквадратические отклонения ошибок этих оценок (СКО) $D_{FRD\,j\,(0)}/\sigma_{FRD\,j\,(0)}$, $D_{FRD\,j+1\,(0)}/\sigma_{FRD\,j+1(0)}$ и $D\tau_{ASD\,j\,(0)}/\sigma\tau_{ASD\,j\,(0)}$, $D\tau_{ASD\,j+1\,(0)}/\sigma\tau_{ASD\,j+1\,(0)}$, соответственно. На основе таких оценок НЧВИ и данных о параметрах излучения/обработки ЛЧМ-сигналов ($F_{r(0)}/T_{r(0)}$, $S_{LFM\,j(0)}$, $S_{LFM\,j+1(0)}$, длительность и количество импульсов в пачке, ширина дискретов частоты, дальности и др.) требуется: однозначное определение дальности и скорости сближения/удаления ВО; качественно-количественная оценка потенциальной точности таких определений.

Фоно-целевая, сигнально-шумовая и помеховая обстановка

ДДЧ по ЛЧМ-сигналу ВО, в общем виде, может быть представлено выражением:

$$F_{RD} = F_D + S\,T_{ob} = F_D + S\,(2R_{ob}/c) = \\ = F_D + S\,[r_k\,T_r + \tau_{ASD}], \qquad (1)$$

где $F_D = 2V_R / \lambda$ – доплеровская частота сигнала ВО, обусловленная скоростью V_R; λ – длина волны; c – скорость радиоволны; $S = (-S_{LFM})$ – дальномерная крутизна ЛЧМ, обратная по знаку заданной скорости изменения несущей частоты, физически реализуемой задающим генератором; T_{ob} – однозначная задержка ЛЧМ-сигнала ВО; $R_{ob} = (c/2)\,T_{ob}$ – дальность ВО, которая также определяется выражением:

$$R_{ob} = (c/2)\,[r\,T_r + \tau_{ASD}], \qquad (2)$$

где $r_k = int\,\{2\,R_{ob}/(c\,T_r)\} = int\,\{T_{ob}/T_r\}$ – индекс (номер) ППИ; $int\{.\}$ – операция взятия целой части (*integer*, *fix*, *truncate*).

При известных параметрах траектории ФЦА/ориентации ДНА РЛС границы ДДЧ-спектра МОЗ по БЛ могут быть получены на основе соотношений, аналогичных (1), например, по максимуму и минимуму ДДЧ по всей совокупности облучаемых БЛ участков земной поверхности, разбитых на элементарные фрагменты:

$$F_{RD\,\max\,sl} = \max\,\{F_{D\,sl\,(k,i)} + S\,(2\,R_{sl\,(k,i)}/c)\}$$

для всех k =1, …, N_{sl} и i =1, …, I_{ef};

$$F_{RD\,\min\,sl} = \min\,\{F_{D\,sl\,(k,i)} + S\,(2\,R_{sl\,(k,i)}/c)\})\}$$

для всех k =1, …, N_{sl} и i =1, …, I_{ef},

где I_{ef} – количество элементарных участков в границах «следа» k-го БЛ на земной поверхности; $F_{D\,sl\,(k,i)} = (2W/\lambda)\cos\varphi_{\,(k,i)}$ – ДЧ из-за радиальной проекции скорости ФЦА W при движении носителя РЛС (на направление к центру i-го элементарного фрагмента поверхности в границах «следа» k-го БЛ); $\varphi_{\,(k,i)}$ и $R_{sl\,(k,i)}$ – соответственно угол между вектором скорости W и направлением на центр этого фрагмента и наклонная дальность до этого центра. Следует отметить, что при S<0 и движении РЛС существуют особенности деформации/смещения ДДЧ-спектра МОЗ по БЛ, которые учитываются при адаптивном определении границ спектра и режекции МОЗ, например, как в работе [6]. Не теряя общности постановки задачи, далее рассматривается ситуация при W≈0 (стационарный радар, РЛС на «зависшем» вертолете и другие варианты), когда эти особенности фактически не проявляются и при $S_j = (-S_{j+1})$>0, и границы соответствующих спектров МОЗ по БЛ [0; $F^{(+)}{}_{RD\,\max\,sl}$] и [$F^{(-)}{}_{RD\,\min\,sl}$; F_r] – «зеркально» симметричные (см. рис. 3).

На рис. 3 показаны следующие ситуации:

1. Для «зависшего» ВО (F_D≈0) его ДДЧ $F^{(+)}{}_{RD}$ и $F^{(-)}{}_{RD}$ недоступны для измерения в диапазоне дальностей $[R^*{}_{nd\,(0)}; R^*{}_{nd\,(1)}]$, $R^*{}_{nd\,(0)} = 0$, $R^*{}_{nd\,(1)} = (c/2)T_{SL\,\max} = R_{\,sl\,\max}$, где $T_{SL\,\max}$ – максимальная однозначная задержка сигнала от облучаемой БЛ поверхности; $R_{sl\,\max}$ – максимальная наклонная дальность до участков поверхности, формирующих МОЗ по БЛ

Аналогично, в диапазоне $[R^*{}_{nd\,(2)} = F_r/|S|$; $R^*{}_{nd\,(3)} = R^*{}_{nd\,(2)} + R_{sl\,\max}]$. В общем виде, получается следующее выражение для определения «слепых» диапазонов дальностей:

$$\Delta R^*{}_{nd} = R_{\,sl\,\max};\ [R^*{}_{nd\,(J)} = J\,F_r\,(0{,}5c/|S|);$$

$$R^*{}_{nd\,(J+1)} = R^*{}_{nd(J)} + \Delta R^*{}_{nd}],\ J = 0, 1, \ldots \qquad (3)$$

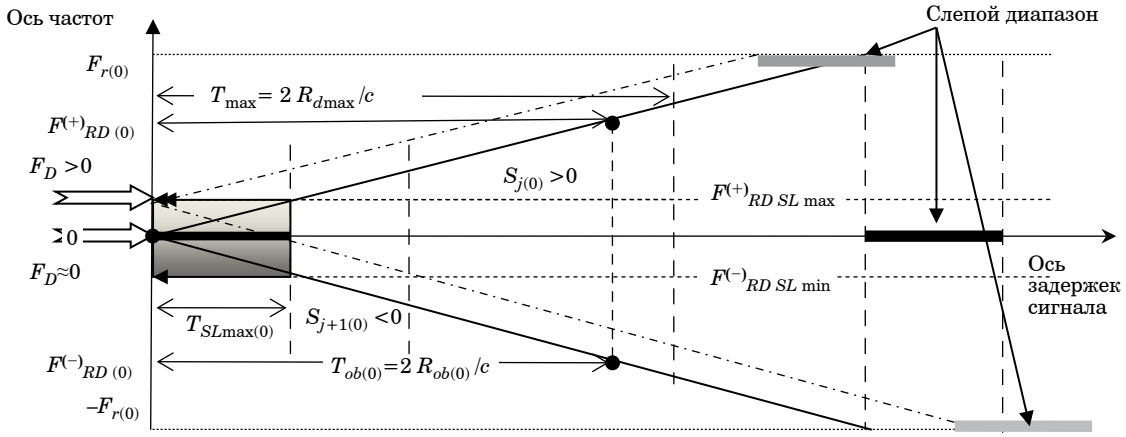


Рис. 3. Границы спектра МОЗ по БЛ, ДДЧ сигналов «зависшего» и сближающегося ВО при $S_j = (-S_{j+1}) > 0$

Вне диапазонов (3) для измерения доступна пара ДДЧ $\{F^{(+)}_{RD}; F^{(-)}_{RD}\}$.

2. При движущемся ВО ($F_D > 0$ или $F_D < 0$) симметрия слепых диапазонов нарушается. Например, для приближающегося ВО (см. рис. 3) в зависимости от скорости/ДЧ границы диапазонов (3) при $S > 0$ смещаются влево, при $S < 0$ – вправо. При удалении ВО – наоборот.

В общем виде, в расчетах вида (3) следует использовать выражения:

$$R^*_{nd\,(J)} = 0{,}5\ \text{с}\ \{J\,(F_r / |S|) - (F_D / S)\};$$
$$R^*_{nd\,(J+1)} = R^*_{nd\,(J)} + \Delta R^*_{nd}, \qquad (4)$$

причем полученные в результате (3), (4) отрицательные значения принимаются как нулевые.

В целом, при ЛЧМ ширина слепых диапазонов дальности зависит от максимальной дальности от ФЦА до фрагментов поверхности, формирующих МОЗ по БЛ. Положение этих диапазонов (по шкале дальности ВО) зависит от ДЧ/радиальной скорости ВО, ширины и размещения (по шкале частот в пределах ЧПИ) слепых диапазонов по ДДЧ, обусловленных МОЗ по БЛ, которые, в свою очередь, зависят от крутизны ЛЧМ, значения ЧПИ; радиальных компонент скорости ФЦА РЛС и максимальной дальности до земли по направлениям БЛ. При этом возможны различные комбинации количества, ширины и положения слепых диапазонов дальности при бинарных ЛЧМ-пачках и, как следствие, варианты обнаружения/измерения: 1) по двум пачкам; 2) по одной пачке. В рамках данной работы детально рассматривается только вариант 1), т. е. при исходной паре НЧВИ/оценок:

$$\{F_{RD\,j\,(0)}; \tau_{ASD\,j\,(0)}\} \text{ и } \{F_{RD\,j+1\,(0)}; \tau_{ASD\,j+1\,(0)}\}.$$

Метод определение дальности/скорости при двух частотно-временных измерениях

По паре ЛЧМ-пачек при интенсивном движении ВО превышение порога обнаружения может наблюдаться в разных дискретах дальности/НЗС из-за смещения НЗС вследствие изменения дальности за время $t_{j+1/j}$ между моментами излучения пачек. В данной работе, учитывая «зависание» или малые скорости рассматриваемого ВО и малое значение $t_{j+1/j}$, допускается, что обнаружение по двум ЛЧМ-пачках фиксируется в одном и том же дискрете и оценки НЗС $\tau_{ASD\,j+1(0)} = \tau_{ASD\,j+1(0)} = \tau_{ASD(0)}$. При «бинарных» частотных измерениях ($F_{RD\,j(0)}$ и $F_{RD\,j+1(0)}$) существует возможность определения скорости $V_{R(0)}$ / дальности $R(0)$ ВО известными способами [10, 11]. При указанных допущениях и при отсутствии ускорения расчетные соотношения [10, 11] принимают вид:

$$V_{R(0)} = (\lambda/2)\,[F_{RD\,j+1(0)} - (S_{j+1}/S_j)\,F_{RD\,j\,(0)}]/$$
$$[1 - (S_{j+1}/S_j)]; \qquad (5)$$
$$R^*_{(0)} = (c/2)\,[F_{RD\,j+1(0)} - F_{RD\,j\,(0)}]/$$
$$[S_{j+1} - S_j)], \qquad (6)$$

причем при инвертируемой ЛЧМ, например, при $S_j > 0$ и $S_{j+1} = (-S_j) = S$, вид (5) и (6):

$$V_{R(0)} = (\lambda/2)\,[F_{RD\,j+1\,(0)} + F_{RD\,j(0)}]/2; \qquad (7)$$
$$R^*_{(0)} = (c/2)\,|[F_{RD\,j+1(0)} - F_{RD\,j(0)}]|/2S. \qquad (8)$$

Далее по результатам (6) или (8) оценивается индекс ППИ $r_{(0)} = int\ \{2R^*_{(0)}/(c\ T_{r\,(0)})\}$ и дальность ВО корректируется по соотношению вида (2): $R_{ob\,(0)} = (c/2)\,[r_{(0)}\,T_{r\,(0)} + \tau_{ASD\,(0)}]$. В ряде случа-

ев – при высокой ЧПИ и относительно большой ширине доплеровских фильтров – точность определения $R^*_{(0)}$ частотным способом недостаточна для полного устранения неоднозначности по индексу ППИ, т. е. абсолютная ошибка $\delta r_{(0)}$ оценивания индекса ППИ $r_{(0)}$ ± может составлять несколько единиц и тогда коррекция вида (2) неэффективна. При этом оценка $R_{ob(0)}$ в сравнении с $R^*_{(0)}$ может иметь худшую точность. В силу этого возникает необходимость излучения дополнительных пачек импульсов при $var\{T_r\}$, которые обеспечат гарантированное «снятие» неоднозначности ППИ ($\delta r = 0$) и, следовательно, возможность высокоточного «захвата» траектории, устойчивого сопровождения объекта. Очевидно, что при этом длительность захвата в сеансе наблюдении существенно возрастает.

Предлагается нетрадиционный метод однозначного определения дальности/скорости по паре НЧВИ сигналов бинарных ЛЧМ-пачках, суть которого состоит в следующем.

Как следует из соотношения (1), доплеровская частота определяется выражением:

$$F_D(r) = F_{RD} - S[r\,T_r + \tau_{ASD}],\ r = 0, 1, \ldots,$$
$$r_{\max} = int\{2\,R_{d\,\max}/(c\,T_r\}, \qquad (9)$$

где ДДЧ F_{RD} и НЗС τ_{ASD} – измеряемые/оцениваемые величины; S и T_r – известные параметры ЛЧМ-пачки; r – индекс ППИ, априорно неизвестный для реальной дальности объекта (2).

Тогда, для измеренных/оцененных значений ДДЧ $F^{(+)}_{RD\,j}$ при $S_j>0$ и НЗС $\tau_{ASD\,j}$ для всех возможных значений (в пределах максимальной дальности обнаружения) формируется множество возможных значений доплеровской частоты $\{F^{(+)}_{D\,j}(r)\}$ (см. рис. 4) на основе выражения вида (9), а также диапазон ДЧ/скоростей объекта. Аналогично, по измерениям/оценкам $F^{(-)}_{RD\,j+1}$ при $S_{j+1}<0$ и НЗС $\tau_{ASD\,j+1}$ определяются «квази-ДЧ» $\{F^{(-)}_{D\,j+1}(r)\}$ и диапазоны ДЧ и соответствующих скоростей объекта.

На основе элементов множеств из «квази-ДЧ» $\{F^{(+)}_{D\,j}(r)\}$ и $\{F^{(-)}_{D\,j+1}(r)\}$, вычисленных по соотношениям (9), формируется множество разностей («невязок») этих «квази-ДЧ»:

$$\{\Delta F_{D\,j/j+1}(r)\} = \{F^{(+)}_{D\,j}(r) - F^{(-)}_{D\,j+1}(r)\} =$$
$$= \{(F^{(+)}_{RD\,j} - S_j[r\,T_{r(0)} + \tau_{ASD\,j}]) - (F^{(-)}_{RD\,j+1} -$$
$$- S_{j+1}[r\,T_{r(0)} + \tau_{ASD\,j+1}])\} = \{(F^{(+)}_{RD\,j} - F^{(-)}_{RD\,j+1}) -$$
$$- (S_j - S_{j+1})\,r\,T_{r(0)} - S_j\,\tau_{ASD\,j} + S_{j+1}\,\tau_{ASD\,j+1}$$
$$\text{для всех } r = 0, 1, \ldots, r_{\max}. \qquad (10)$$

При инвертируемой ЛЧМ и вышеуказанных допущениях по НЗС выражение имеет вид:

$$\{\Delta F_{D\,j/j+1}(r)\} = \{(F^{(+)}_{RD\,j} - F^{(-)}_{RD\,j+1}) -$$
$$- 2S\,r\,T_{r(0)} - 2S\,\tau_{ASD\,j/j+1}\}. \qquad (11)$$

Как оценка r^* индекса ППИ принимается значение r, которому соответствует минимум модуля отклонения ДЧ по всему множеству невязок $\{\Delta F_{D\,j/j+1}(r)\}$, а оценка дальности $R^*_{j/j+1}$ определяется по выражению вида (2) при $r = r^*$, т. е.

$$r^* \to \min\{|\Delta F_{D\,j/j+1}(r)|\};\ R^*_{j/j+1} =$$
$$= (c/2)[r^*T_{r(0)} + \tau_{ASD\,j+1}]. \qquad (12)$$

Как результирующая оценка ДЧ $F^*_{D\,j/j+1}$ для вычисления скорости V^*_R используется среднее:

$$F^*_{D\,j/j+1} = 0{,}5\{F^{(+)}_{D\,j}(r^*) + F^{(-)}_{D\,j+1}(r^*)\};$$
$$V^*_{R\,j/j+1} = 0{,}5\,\lambda\,F^*_{D\,j/j+1}. \qquad (13)$$

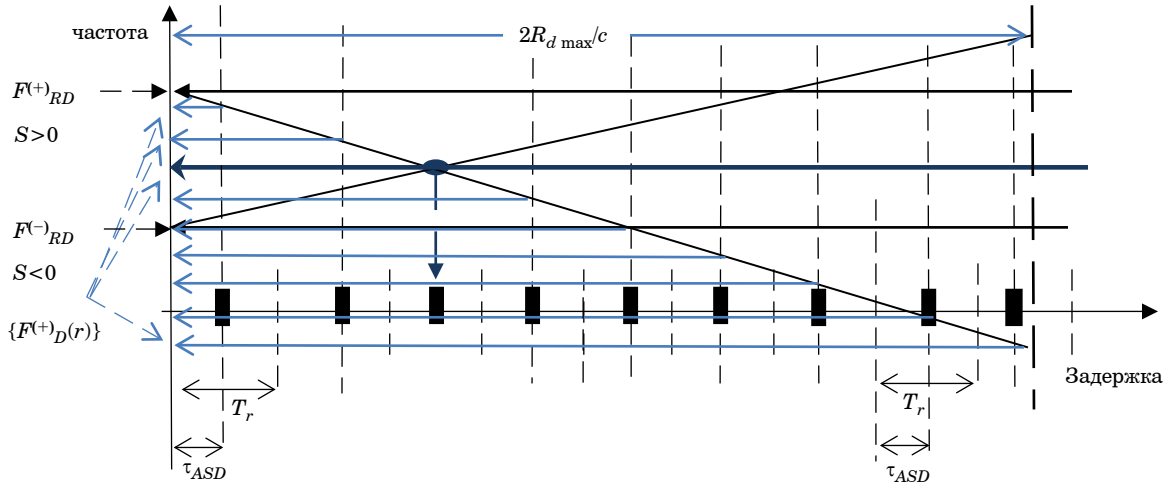


Рис. 4. Геометрическая интерпретация метода определения дальности/скорости по двум НЧВИ

Число анализируемых невязок «квази-ДЧ» (10) – (12) может быть исходно сокращено, например, используя только те значения ДЧ, которые соответствуют пересечению их диапазонов в пределах максимальной дальности обнаружения, т. е. принадлежащие интервалу от $F^{(-)}_{RDj+1}$ до $F^{(+)}_{RDj}$. Кроме того, предварительное выполнение типовой дальнометрии (6) – (8), (2), дополненной процедурой оценивания ошибки определения индекса ППИ $\delta r_{(0)}$, также позволяет сократить диапазона рассматриваемых индексов: $r = r_{(0)} - \delta r_{(0)}, r_{(0)} - \delta r_{(0)} + 1,\ldots, r_{(0)} + \delta r_{(0)}$, где $r_{(0)}$ – оценка индекса, полученная при типовой ДЧМ-дальнометрии.

Аналитическое исследование предлагаемого метода и результаты его имитационного математического моделирования показали, что в сравнении с традиционными частотными способами дальнометрии/измерения скорости использование бинарных НЧВИ позволяет существенно повысить достоверность устранения неоднозначности ППИ и точность определения дальности и скорости.

Заключение

1. Всеракурсное наблюдение малоскоростного объекта при бинарных ЛЧМ-пачках:

– на относительно малых дальностях объекта (≈ 1%…3% от максимальной дальности его обнаружения при высоте антенны РЛС 100…200 м) не исключает возможностей «срыва» обнаружения или единственного обнаружение/измерения при двух зондирующих пачках;

– при больших дальностях практически обеспечивает два обнаружения/неоднозначного частотно-временного измерения, что позволяет использовать известные частотные способы определения дальности/скорости при инвертируемой ЛЧМ с последующей коррекцией дальности по неоднозначным измерениям задержки сигнала.

При этом уровень точности, как правило, недостаточен для дальнейшего сопровождения траектории объекта и требуются дополнительные зондирующие пачки и процедуры обработки измерений для реализации высокоточного «захвата» траектории. Такая же ситуация и при наличии только одного обнаружения/измерения.

2. Комплексное использование частотно-временных измерений в предлагаемом методе обеспечивает эффективную коррекцию как дальности, так и скорости на основе высокоточных измерений неоднозначной задержки ЛЧМ-сигнала. При этом гарантированно обеспечивается устранение неоднозначностей по индексу периода повторения в оценке дальности и по знаку (направлению) радиальной скорости объекта, достигается точность определения траекторных параметров, позволяющая сразу же перейти к режиму сопровождения объекта, исключив из циклограммы сеанса наблюдения традиционно используемый подрежим «захвата».

3. Предложенный метод обобщается для применения при бинарных ЛЧМ-пачках с произвольными, но не равными, значениями крутизны, может использоваться в комбинации с традиционными частотными способами, используя полученные в них «грубые» оценки дальности/скорости в интересах для сокращения вычислительных итераций и повышения достоверности конечных результатов.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ, проект № 22-19-00058.

Библиографический список

1. *Скольник М.* Справочник по радиолокации: в 3 т. Т. 3; пер. с англ. / Под ред. К. Н Трофимова. М.: Сов. радио, 1978. 528 с.

2. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. М. И. Сколника; под общей ред. В. С. Вербы., М.: Техносфера, 2015. 672 с.

3.. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский, А. Р. Ильчук, А. А. Герасимов. М.: Изд. ВВИА им. проф. В.И. Жуковского. 2006. 1112 с.

4. *Kovregin V. N., Kovregina G. M.* Adaptive-robust Methods for Detecting, Capturing and Tracking Hovering, Low- And High-speed Objects in Integrated Radar-Inertial Systems with Quasi-continuous Radiation. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9470845 (дата обращения: 27.11.2022).

5. *Kovregin V. N., Kovregina G. M., Murzaev A. S.* A Unified Method for Observation of an Air Object with a Complex Spectrum in Radar with Quasi-Continuous Radiation. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9815395 (дата обращения: 27.11.2022).

6. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Адаптивно-робастная калмановская фильтрация неоднозначных измерений при дальнометрии в импульсно-доплеровских радарах с квазинепрерывным излучением // Сб. материалов Международного Форума СМММ-2021: Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве. 2021. С.70–73.

7. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Унифицированный метод адаптивно-робастной редукции неопределенностей при раскрытии «слепых» зон и дальнометрии воздушных объектов в импульсно-доплеровских радарах // Системный анализ и логистика. 2021. № 4(30). С. 42–48.

8. Патент на изобретение RU 2 697 509 C2, МПК G01S 13/08 (2006/02). Способ обнаружения, измерения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина; приор. 25.05.2017; заявитель, патентообладатель Российская Федерация, опуб. 15.08.2019, Бюл. № 23.

9. Патент на изобретение RU 2 692 912 C1 МПК G01S 13/00, G01S 13/00 (2006/01). Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения импульсов и линейной частотной модуляции / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина; приор. 13.02.2018; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, опубл. 01.07.2018, Бюл. № 19.

10. *Kovregin V. N., Kovregina G. M., Murzaev A. S.* Method of Observation/Recognition/Classification of an Aerial Object by Chirp Echo Signals with a Complex Spectrum. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9815360 (дата обращения: 27.11.2022).

УДК 629.7.017

М. П. Корельский*,*
магистрант, инженер
Н. И. Фоминов*
ведущий инженер
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***АО институт авиационного приборостроения «Навигатор»*
****ООО «Софтвер Лабс»*

АНАЛИЗ СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ARINC-429, ПРИВОДЯЩИХ К ИСКАЖЕНИЮ ВЫДАВАЕМОЙ СПСВ ИНФОРМАЦИИ

В статье проведен анализ причин скрытых отказов функции передачи данных по ARINC-429, приводящих к искажению информации, выдаваемой системой предупреждения столкновений в воздухе. Выполнена оценка соответствия предъявляемым требованиям безопасности и сформулированы рекомендации к реализации канала передачи данных.
Ключевые слова: *безопасность полетов, передача информации, искажения информации, СПСВ, ARINC-429*

M. P. Korelski*,*
Postgraduete Student, Engineer
N. I. Fominov*
Leading Engineer
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***JSC Institute of Aviation Instrumentation «Navigator»*
****LLC «Software Labs»*

ANALYSIS OF LATENT FAILURES OF ARINC-429 DATA TRANSMISSION FUNCTION, LEADING TO DISTORTION OF PROVIDED BY THE TCAS INFORMATION

The article analyzes the causes of latent failures of the ARINC-429 data transmission function, leading to distortion of provided by the traffic collision avoidance system information. Compliance with safety requirements assessed and recommendations for the implementation of a data transmission channel formulated.
Keywords: *flight safety, information transfer, distortion of information, TCAS, ARINC-429.*

Введение

Высокий темп развития технологий способствует непрерывному усложнению современной авионики. Возрастающий уровень интеграции между функциями воздушного судна и системами хоть и дает существенную выгоду, но также значительно расширяет возможности появления новых ошибок, особенно для совместно выполняемых функций. При проектировании таких систем высокое внимание следует уделять обеспечению безопасности их функционирования на воздушном судне.

Одной из наименее изученных опасностей является передача ложных данных, при которой потребителю выдается искаженная информация, а средства встроенного контроля не способны определить фактический отказ, т. е. скрытый отказ функции передачи данных. Вероятность возникновения такого события с учетом высокой достоверности современных встроенных средств контроля является относительно невысокой, однако, при проектировании функций с уровнем гарантии проектирования FDAL A (вероятность отказа за летный час не более 10^{-9}) даже такой величиной нельзя пренебрегать.

Настоящая работа посвящена исследованию причин скрытых отказов реализованной в системе предупреждения столкновений в воздухе (СПСВ) функции передачи данных во внешние взаимодействующие системы по интерфейсу ARINC-429, приводящих к искажению выход-

ной параметрической информации, а также к выдаче ложной сигнальной информации во время полета. Оценка безопасности выполнена в соответствии с SAE ARP4761 [1].

Обзор функции передачи данных

В рамках данной статьи рассматривается функция передачи данных по ARINC-429 от СПСВ в систему электронной индикации. Она используется для выполнения функции уровня системы – функции предупреждения столкновения (ФПС).

ФПС обеспечивает выработку и предоставление экипажу визуальной и звуковой консультативной информации о воздушном движении и рекомендаций о маневре в вертикальной плоскости согласно требованиям технологии ИКАО БСПС II [2].

Передача информации по ARINC-429 осуществляется последовательным биполярным кодом с скоростью передачи 12,5 кбит/с. В состав передаваемой информации входят следующие 32-х разрядные слова: управляющие слова, слова состояния, слова начала и конца передачи данных и информационные слова.

Группа эксплуатации СПСВ, в соответствии с [3], принята A_{IC} (аппаратура дозвуковых самолетов), температура окружающей среды +55 °С.

Аппаратное обеспечение, реализующее канал передачи данных по ARINC-429, представлено на рис. 1.

ЭРИ, реализующие функцию передачи данных, и их интенсивности отказов, рассчитанные в соответствии с [4], приведены в табл. 1.

К выдаче потребителю недостоверной информации могут привести неисправности не только самого интерфейса передачи данных, но и элементов, выполняющих функции обработки и хранения передаваемых данных. Часть этих функций реализуют микросхемы, и определять расчетным способом интенсивность их отказов, приводящих именно к искажению информации, зачастую нецелесообразно, но можно утверждать, что она должна быть меньше интенсивности полного отказа такого элемента.

Оценка функциональной опасности

Оценка функциональной опасности (FHA) определяется как упорядоченное всестороннее исследование функций, выполняемых системой, для выявления и классификации их отказных состояний в соответствии со степенью опасности.

В оценке функциональной опасности ФПС, представленной в табл. 2, подробно рассмотрены функциональные опасности, приводящие только к не сигнализируемой (не выявляемой встроенными средствами контроля – ВСК) выдаче потребителю недостоверной информации по ARINC-429. Отказы источников передаваемой информации (взаимодействующего с СПСВ оборудования и вычислителя) мы подробно рассматривать не будем.

Дерево отказов ФПС, построенное по информации из табл. 2, представлено на рис. 2.

Важно отметить, что ВСК не охватывают элементы из табл. 1. Передатчик ARINC-429 не имеет обратной связи с вычислительным модулем, т. е. не может контролироваться ВСК СПСВ, а приемник ARINC-429 не подтверждает получение информации и находится в взаимодействую-

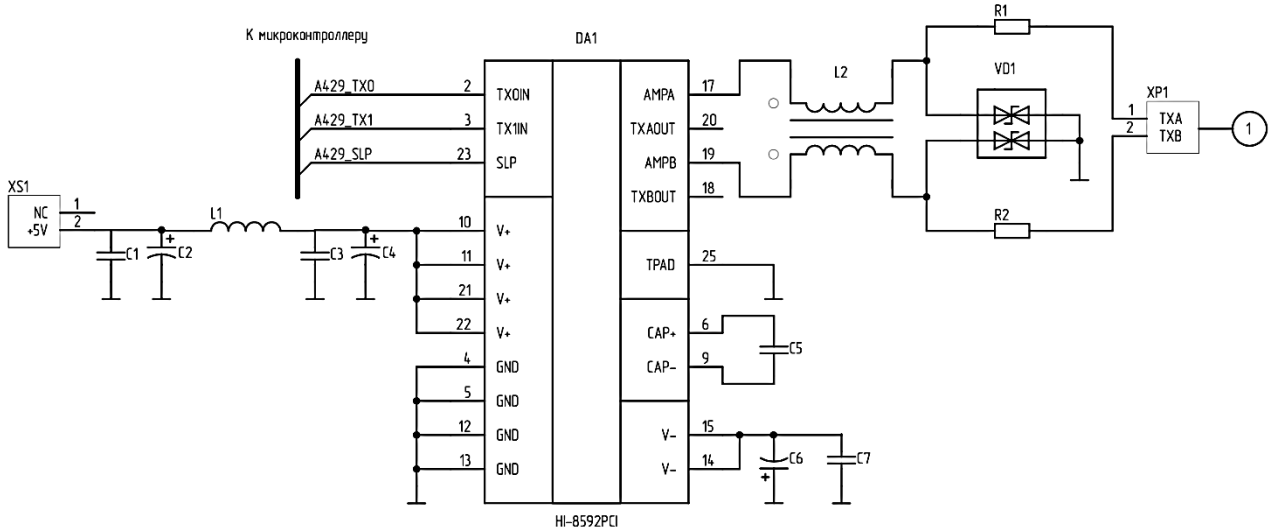


Рис. 1. Аппаратное обеспечение, реализующее передачу данных по ARINC-429

Таблица 1

ЭРИ, реализующие функцию передачи данных

Позиционное обозначение	Наименование	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
C2	К53-68С-16В-33мкФ±10%	0,094
C1	0402-X7R-16В-0.1мкФ±10%	0,00683
C3	0603-X7R-25В-0.1мкФ±10%	0,004156
C4	К53-68С-10В-68мкФ±10%	0,14
C6	К53-68С-10В-47мкФ±10%	0,14
C5	0805-X5R-16В-4.7мкФ±10%	0,01084
C7	0603-X7R-25В-0.1мкФ±10%	0,004156
DA1	HI-8592PCI	0,05466
L1	BLM18SG221TN1	0,002544
L2	DLP31SN551ML2	0,002544
R1	Р1-12-0.25-24 Ом±5%-Т	0,003544
R2	Р1-12-0.25-24 Ом±5%-Т	0,003544
VD1	SP1002-02JTG	0,07501
XS1	ASP-134603-01	0,09576
XP1	1410187-1	0,09643
1	Кабель ARINC	0,4345
Всего		1,16852

Таблица 2

Оценка функциональной опасности (ФО) ФПС

Номер ФО	Формулировка ФО	Степень опасности	Вероятность возникновения за час полета
F1	Потеря ФПС	–	–
F1.1	Сигнализируемая потеря ФПС	УУП	–
F1.2	Ложная потеря ФПС	СС	–
F1.3	Потеря ФПС, не выявляемая ВСК	СС	–
F1.3.1	Выдача недостоверной информации, которая не выявляется ВСК	СС	не более 10^{-5}
F1.3.1.1	Прием недостоверной информации от взаимодействующего оборудования	–	–
F1.3.1.2	Искажение информации при ее формировании, которое не выявляется ВСК	–	–
F1.3.1.2.1	Отказ аппаратного обеспечения вычислителя, не выявляемый ВСК	–	–
F1.3.1.2.2	Отказ программного обеспечения вычислителя, не выявляемый ВСК	–	–
F1.3.1.3	Искажение информации при ее передаче по ARINC-429, которое не выявляется ВСК	–	–
F1.3.1.3.1	Отказ аппаратного обеспечения ARINC-429, не выявляемый ВСК	–	–
F1.3.2	Невыдача информации, которая не выявляется ВСК	–	–

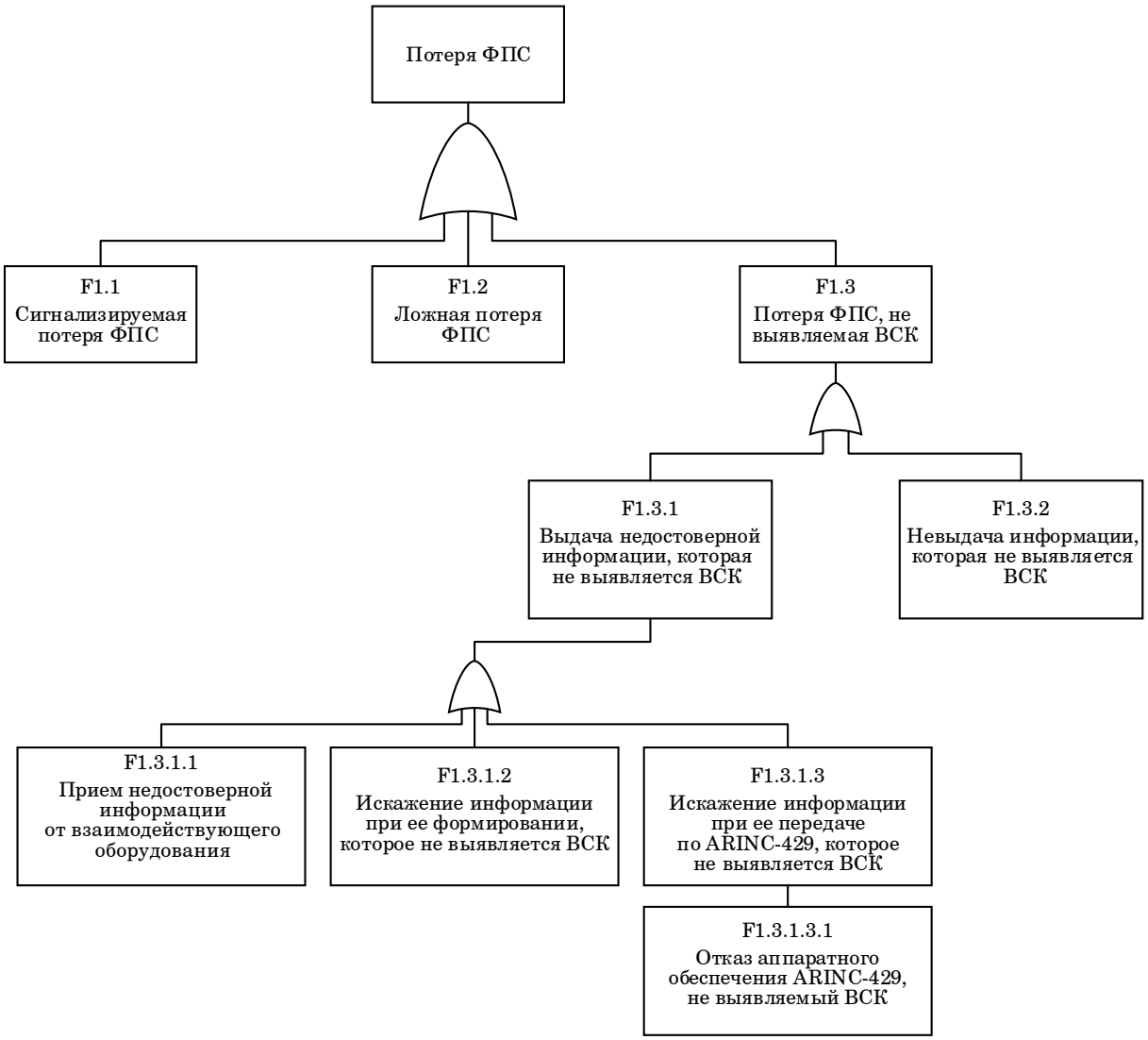


Рис. 2. Дерево отказов ФПС

щем оборудовании, т. е. контроль функции передачи данных по ARINC-429 можно выполнить только на принимающей стороне.

Анализ видов и последствий отказов

Анализ видов и последствий отказов (FMEA) является систематическим методом анализа снизу-вверх, который предназначен для определения видов единичных отказов и оценки их влияния на вышестоящий уровень [1, 5]. В нашем случае разбивать приведенную на рис. 1 схему на функциональные блоки нецелесообразно, поэтому выполнялся качественный компонентный FMEA, представленный в табл. 3.

Виды отказов ЭРИ приведены в соответствии с [1, 6, 7, 8] и рассматриваются с точки зрения их влияния на функциональные отказы. В качестве видов отказов ЭРИ рассмотрены только короткое замыкание и обрыв, так как они являются наиболее распространенными. Информация об интенсивностях видов отказов отсутствует, по этой причине все виды отказов приняты равновероятными.

Вероятность события F1.3.1.3 при условии независимости отказов ЭРИ можно определить по формуле:

$$Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N} e^{-\lambda_i t}, \qquad (1)$$

где λ_i – вероятность отказа i-го ЭРИ; N – количество ЭРИ; t – наработка.

За один час полета по формуле (1) получим вероятность искажения информации при ее передаче по ARINC-429 $Q = 4{,}864 \cdot 10^{-7}$.

Таблица 3

Анализ видов и последствий отказов

Поз. обозн.	Вид отказа	Интенсивность отказа $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Последствие отказа на аппаратном уровне	Последствие отказа на уровне функций
C2	Короткое замыкание	0,047	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
	Обрыв	0,047	Ухудшение фильтрации напряжения питания	F1.3.1.3
C1	Короткое замыкание	0,003415	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
	Обрыв	0,003415	Ухудшение фильтрации напряжения питания	F1.3.1.3
C3	Короткое замыкание	0,002078	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
	Обрыв	0,002078	Ухудшение фильтрации напряжения питания	F1.3.1.3
C4	Короткое замыкание	0,07	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
	Обрыв	0,07	Ухудшение фильтрации напряжения питания	F1.3.1.3
C6	Короткое замыкание	0,07	Отсутствуют импульсы -5В	F1.3.1.3
	Обрыв	0,07	Рост помех при передаче	F1.3.1.3
C5	Короткое замыкание	0,00542	Сигнал не передается	F1.3.2
	Обрыв	0,00542	Сигнал не передается	F1.3.2
C7	Короткое замыкание	0,002078	Отсутствуют импульсы -5В	F1.3.1.3
	Обрыв	0,002078	Рост помех при передаче	F1.3.1.3
DA1	Короткое замыкание	0,02733	Сигнал не передается	F1.3.2
	Обрыв	0,02733	Сигнал не передается	F1.3.2
L1	Короткое замыкание	0,001272	Ухудшение фильтрации напряжения питания	F1.3.1.3
	Обрыв	0,001272	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
L2	Короткое замыкание	0,001272	Рост помех при передаче	F1.3.1.3
	Обрыв	0,001272	Сигнал не передается	F1.3.2
R1	Короткое замыкание	0,001772	Снижение защиты от перенапряжения	Без последствий
	Обрыв	0,001772	Сигнал не передается по ТХА1	F1.3.2
R2	Короткое замыкание	0,001772	Снижение защиты от перенапряжения	Без последствий
	Обрыв	0,001772	Сигнал не передается по ТХВ1	F1.3.2
VD1	Короткое замыкание	0,037505	Сигнал не передается по ТХА1 и ТХВ1	F1.3.2
	Обрыв	0,037505	Отсутствие защиты от скачков напряжения в линии передачи	Без последствий
XS1	Короткое замыкание	0,04788	Сигнал не передается	F1.3.2
	Обрыв	0,04788	Отсутствует напряжение питания DA11	F1.3.2
XP1	Короткое замыкание	0,04822	Сигнал не передается	F1.3.2
	Обрыв	0,04822	Сигнал не передается	F1.3.2
1	Нарушение экранирования	0,21725	Возникновение аддитивных импульсов	F1.3.1.3
	Обрыв	0,21725	Сигнал не передается	F1.3.2

Выводы

В результате проведенного анализа было выявлено, что причинами скрытых отказов функции передачи данных по ARINC-429, приводящих к искажению передаваемой от СПСВ информации, могут являться:

– прием недостоверной информации от взаимодействующего оборудования, который не выявляется ВСК;

– искажение информации при ее формировании, которое не выявляется ВСК;

– искажение информации при ее передаче по ARINC-429, которое не выявляется ВСК.

В требованиях к СПСВ вероятность выдачи потребителю недостоверной информации за один час полета должна составлять не более 10^{-5}. Расчетная вероятность искажения информации при ее передаче по ARINC-429 за один час полета составила $4{,}864 \cdot 10^{-7}$ при интенсивности отказа $\lambda = 4{,}864 \cdot 10^{-7}$ 1/ч.

По дереву отказов, представленному на рис. 2, можно определить, что для обеспечения соответствия требованиям безопасности к скрытой выдаче недостоверной информации суммарная интенсивность выдачи взаимодействующим оборудованием недостоверной информации, ее искажения при формировании в СПСВ и скрытой невыдачи потребителю должна составлять не более $9{,}514 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

В рассматриваемом примере отсутствие охвата встроенными средствами контроля СПСВ канала передачи информации по ARINC-429 не создает критическую угрозу (существующий риск является приемлемым), поэтому вывод о необходимости резервирования канала или расширения охвата ВСК можно сделать только после выполнения анализа видов и последствий отказов других элементов, участвующих в приеме и формировании информации.

Так как обеспечение возможности контроля передаваемой информации является обязательным требованием, то контроль передаваемой от СПСВ по ARINC-429 информации должен осуществляться во взаимодействующем оборудовании по:

– четности разрядов в слове;

– количеству разрядов в слове;

– матрице состояния.

Библиографический список

1. SAE ARP4761. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. Warrendale, PA: SAE, 1996. 331 p.

2. Doc 7300. Конвенция о международной гражданской авиации ИКАО: Приложение 10, том IV, глава 4 // Международная организация гражданской авиации. 2006. 116 с.

3. MIL-HDBK-338B. Military handbook: Electronic reliability design handbook. Washington DC: Department of Defense, 1998. 1046 p.

4. MIL-HDBK-217F (Notice 2). Military handbook: Reliability prediction of electronic equipment. Washington DC: Department of Defense, 1995. 205 p.

5. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. 14 с.

6. АО «Компэл» Электролитические конденсаторы: особенности применения // Compel.ru: информационно-справочный портал. URL: https://www.compel.ru/lib/57937 (дата обращения: 27.11.2022).

7. *Харченко В. А.* Проблемы надежности электронных компонентов // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18. № 1. С. 52–57.

8. *Лемешко Н. В., Струнин П.* Анализ сигналов стандартов MIL-1553 и Arinc-429 с использованием осциллографов компании Rohde&Schwarz // Компоненты и технологии. 2018. № 3. С. 114–122.

УДК 528.854

Р. Н. Малаханов*
кандидат технических наук, доцент
А. К. Голенко*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕКТОРОВ ТЕКСТА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В работе рассматриваются алгоритмы детекции текстовых данных на изображениях естественных сцен, которые могут быть получены непосредственно с помощью фотофиксации или являться кадром видеоряда. Анализ сводится к оценке точности количества распознанных точек, содержащих текст, по отношению к общему количеству.
Ключевые слова: *детектор, дескриптор, особая точка.*

R. N. Malakhanov*
PhD, Tech., Associate Professor
A. K. Golenko*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEXT DETECTORS ON IMAGES

The paper considers algorithms for detecting text data on images of natural scenes, which can be obtained directly using photographic fixation or be a frame of a video sequence. The analysis is reduced to assessing the accuracy of the number of recognized points containing text in relation to the total number.
Keywords: *detector, descriptor, singular point.*

Введение

Согласно ГОСТ 24297-87 при входном контроле на предприятии проводится проверка компонентов, деталей и др. Некоторые предприятия используют видеофиксацию самого процесса контроля. Данные сохраненные в видеоформате могут хранится до нескольких лет. Процесс идентификации продукции может сопровождаться ошибками, связанными с человеческим фактором. Стоит отметить, что уже существуют стандарты маркировок, использующие двумерные штрих-коды, идентифицируемые автоматизированными считывателями с использованием простых систем машинного зрения. Однако, в таком случае корректное считывание может происходить только при определенных условиях, таких как правильная ориентация объекта, стабильная освещенность, однородность фона маркировки. Такие идеальные условия как правило могут быть не всегда. Текст, содержащийся в видеокадрах, обычно является объектом естественной сцены, на которой он может быть размещен в разных условиях освещения, неоднородном фоне, различных углах поворота. В качестве отдельного этапа для решения задач такого рода может быть использован предварительный поиск областей, содержащих текст.

Детекторы и дескрипторы

Для извлечения из изображения необходимых данных нужно привязаться к его локальным признакам. На изображениях такими признаками являются особые точки.

Особые точки характерны тем, что окружающие их окрестности отличаются от окрестностей других точек, находящихся рядом. В зависимости от алгоритма окрестность может быть выбрана разного размера, как правило она представляет собой прямоугольное пространство некоторого числа пикселей.

В [1] и [2] выделяются некоторые свойства, которыми должны обладать особые точки:

1. Отличимость – особая точка должна быть отличительной на фоне и быть уникальной.

2. Инвариантность к афинным преобразованиям изображения, на котором будет выполняться детекция целевого объекта.

3. Детекция особой точки должно быть устойчиво к различным шумам.

4. Уникальность – кроме локальной отличимости, особая точка должна обладать глобальной уникальностью для улучшения различимости повторяющихся паттернов.

5. Повторяемость – вне зависимости от обзора и освещения, особая точка должна находится на своем месте.

6. Локальность – нахождение особой точки в небольшой окрестности для снижения чувствительности к искажениям при съемке одной сцены в разных условиях освещенности и ракурсов.

7. Количество – зарегистрированных точек должно быть достаточно для обнаружения объекта. Плотность локации особых точек должно давать информацию о содержимом изображения.

8. Эффективность – скорость обнаружения особых точек должна быть высокой.

Виды детекторов

Алгоритмы, способные извлекать из изображения особые точки, называются детекторами. Для нахождения особых точек используются детекторы углов. Углами называют особые точки, в окрестности которых интенсивность яркости изображения сводится к этой точке по направлению градиента.

Алгоритмы угловой детекции разделяют на 3 категории:

1. Основанные на значениях интенсивности пикселей изображения.

2. Определяющие особые точки из контуров.

3. Использующие шаблонные модели изображений.

Алгоритмы первой категории чаще всего используются на практике.

Метод максимально-стабильных экстремальных областей (MSER) [3]

В данном методе детекции из исходного изображения формируется набор других изображений бинаризованных с разным пороговым значением.

Первое изображение с минимальным порогом имеет минимальное значение интенсивности, далее с каждым новым рисунком интенсивность возрастает. В каких-то точках интенсивность остается неизменной, т. е. цвет в зависимости от порога не меняется.

Экстремальная область $Q \subset D$ это такая область, что для всех $p \in Q, q \in \partial Q : I(p) > I(q)$, где ∂Q – внешняя граница из области Q есть область максимальной интенсивности или, если $I(p) < I(q)$ – область минимальной интенсивности.

Экстремальная область Q_{i*} является максимально стабильной тогда, когда $q(i) = |(Q_i + \Delta) / / (Q_i - \Delta)| / |Q_i|$ имеет локальный максимум (или минимум) в i^* для всего набора изображений, которые были бинаризованы. Такая экстремальная область содержит особую точку.

Особые точки с помощью ускоренного теста окрестностей (FAST) [4]

Алгоритм основан на поиске угловых особых точек, формирующимися из граней, которые являются границами одного и того же объекта.

Особые точки формируются по координатам и изменениям яркости окрестных точек изображения. Вектор градиента функции интенсивности определяется в зависимости от изменения интенсивностей соседних точек изображения.

Вокруг точки кандидата P рассматривается 16-пиксельная окружность с центром в этой точке. Точка является угловой, если для текущей рассматриваемой точки P существуют N смежных пикселей на окружности, интенсивности которых больше I_{p+t} или интенсивности всех меньше I_{p-t}, где I_p – интенсивность точки P и t – пороговая величина. Точка может находится в трех разных состояниях $S_{p \to x}$:

$$S_{p \to x} = \begin{cases} d, I_x \le I_{p-t} \\ s, I_{p-t} < I_x < I_{p+t} \\ b, I_{p+t} \le I_x \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1) d – темнее, s – похожа, b – светлее.

Сравнение интенсивностей происходит для точек с номерами 1, 5, 9 и 13 с интенсивностью в точке P. Если для трех из этих точек выполнится условие (1), то проводится полный тест для всех 16 точек. Эксперименты показали, что наименьшее значение N, при котором особые точки начинают стабильно обнаруживаться, равно $N = 9$.

Далее алгоритм ID3 для классификации особых точек с помощью деревья решений. Алгоритм ID3 оптимизирует порядок, в котором обрабатываются пиксели, в результате чего получается наиболее вычислительно эффективный детектор.

Функция стоимости c дерева решений рассчитывается следующим образом:

$$c = (k_R + R^{-2})(k_N + N^{-2})(k_S + S^{-2}) \quad (2)$$

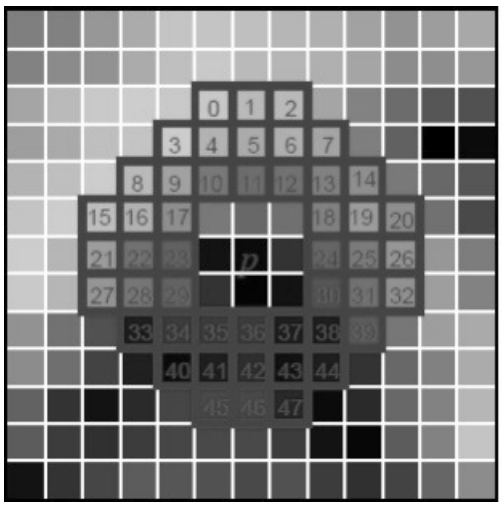


Рис. 1. Окрестность особой точки с вычисленными значениями функции стоимости

В (2) R – мера повторяемости, N – количество обнаруженных особых точек, S – количество узлов в дереве решений.

Ориентированный FAST и повернутый BRIEF (ORB) [5]

В данном детекторе используется дескриптор BRIEF (двоичные робастные независимые элементарные функции), который строится из 256 бинарных сравнений между яркостями пикселов на изображении. Бинарный тест (3) между точками x и y определяется так:

$$\tau(P,x,y) = \begin{cases} 1 : p(x) < p(y) \\ 0 : p(x) \geq p(y) \end{cases} \quad (3)$$

Алгоритм ORB можно разбить на следующие шаги:

1. Сначала вычисляются особые точки с помощью алгоритма FAST на исходном изображении и на наборе уменьшенных изображений.

2. Вычисляются углы ориентации для особой точки по следующим шагам:

– сначала используются моменты яркости окрестности особой точки

$$m_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y),$$

где I – яркость, x и y – координаты;

– с помощью вычисленных моментов яркости находится угол ориентации особой точки: $\theta = \arctan(m_{01}, m_{10})$.

3. С использованием угла ориентации особой точки, последовательность точек для двоичных сравнений в дескрипторе BRIEF поворачивается вместе с этим углом.

Результаты

Приведенные алгоритмы были протестированы с помощью библиотеки “EmguCV”, поставляемой в качестве отдельного пакета платформы “.NET”. В качестве тестируемых изображений использовались фотографии деталей, которые могут проходить входной контроль на предприятии.

Точность определения точек, содержащих символьную информацию на изображениях, выборки из пятидесяти фотоснимков составляет: MSER – 38%, ORB – 53%, FAST – 62%. Также на рис. 2–4 можно видеть, что наилучшим образом в плане детекции текстовых областей сработал детектор FAST.

Также стоит отметить, что описанные алгоритмы (кроме ORB) могут выполняться на микроконтроллерах. Возможность использования параллельной обработки шестнадцати пиксельной окружности в алгоритме FAST позволяет применить данный алгоритм на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Алгоритм MSER также можно запускать параллельно, используя разные пороги бинаризации интересуемого изображения.

Рис. 2. Результаты работы для образца № 1

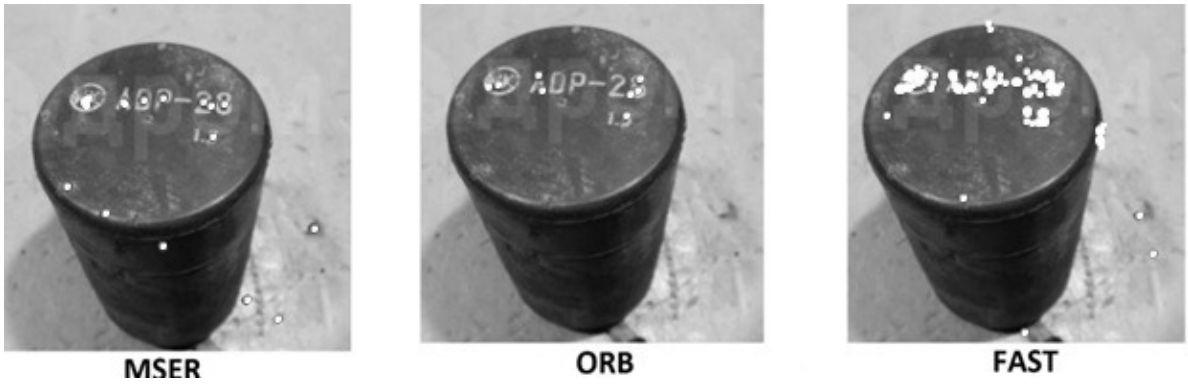


Рис. 3. Результаты работы для образца № 2

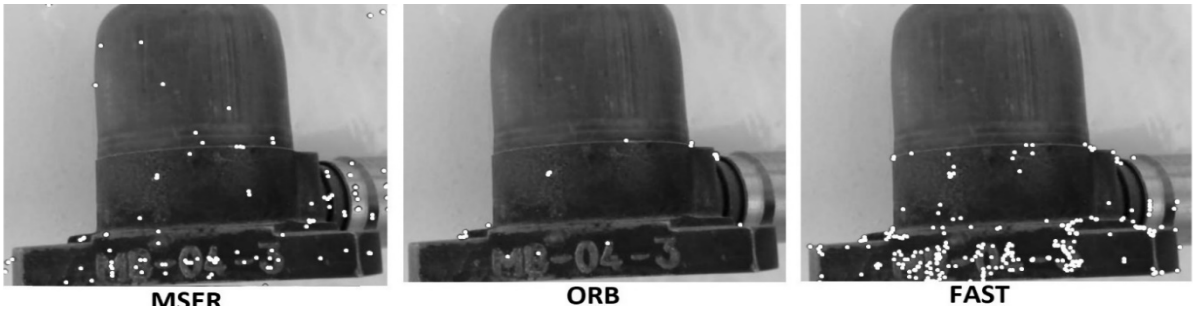


Рис. 4. Результаты работы для образца № 3

Библиографический список

1. *Rodehorst V., Koschan A.* Comparison and evaluation of feature point detectors, 2006.

2. *Tuytelaars Tinne*, *Mikolajczyk Krystian*. Local Invariant Feature Detectors: A Survey, 2008.

3. *Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T.* Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions; proc. of British Machine Vision Conference. 2002. P. 384–396.

4. *Половинкин А. Н.* Детекторы и дескрипторы ключевых точек. Алгоритмы классификации изображений. Задача детектирования объектов на изображениях и методы ее решения / Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2013. 66 с.

5. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF / Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradsk; International Conference on Computer Vision, 2011.

УДК 629.78 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-64-71**

В. В. Перлюк*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Аристов*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ ГРУППЫ МИКРОСПУТНИКОВ

Целью исследований является создание системы радиосвязи на базе орбитальной группировки микроспутников для управления удаленными объектами в труднодоступных районах. Для удешевления конструкции микроспутников было решено жестко закрепить на их корпусах передающую и приемную антенны и использовать для наведения антенн пространственную ориентацию всего аппарата, что серьезно усложнило задачи навигации и ориентации микроспутников в группе, а также потребовало разработки нового метода определения ориентации одиночного микроспутника.
Ключевые слова: *группировка микроспутников, пространственная ориентация, техническое зрение.*

V. V. Perliouk*
PhD, Tech., Associate Professor
A. A. Aristov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (Russia)*

RESEARCH OF OPTO-ELECTRONIC METHODS OF MUTUAL NAVIGATION AND FLIGHT CONTROL OF A GROUP OF MICROSATELLITES

The aim of the project is to create a radio communication system based on an orbital constellation of microsatellites to control remote objects in hard-to-reach areas. To reduce the cost of the design of microsatellites, it was decided to rigidly fix the transmitting and receiving antennas on their bodies and use the spatial orientation of the entire apparatus to point the antennas, which, on the other hand, seriously complicated the tasks of navigation and orientation of microsatellites in a group, and also required the development of a new method for determining the orientation of a single microsatellite.
Keywords: *microsatellite constellation, spatial orientation, technical vision.*

Введение

В ближайшие годы планируется создание новых спутниковых группировок, включающих сотни и даже тысячи микроспутников, взаимодействующих друг с другом. Такая группировка позволяет гибко подстраиваться под быстро меняющуюся текущую ситуацию, взаимно дополняя и преумножая возможности каждого отдельного микроспутника, обеспечивая своеобразный «накопительный эффект» [1, 2].

Основным направлением использования микроспутниковой группировки в данном проекте является создание системы радиосвязи для управления удаленными объектами с центрального наземного поста в виде беспилотных летательных аппаратов и наземных роботов, находящихся в труднодоступных районах Земли [3, 4].

Сформированная таким образом логическая структура используемых каналов связи должна обеспечивать высокую динамику передачи данных, возможность оперативной реконфигурации каналов связи с использованием отделенных друг от друга космических и наземных сегментов. Из рис. 1. видно, что наземный сегмент сети поддерживается каналами связи Земля – орбита, а космический – каналами связи орбита – Земля. Для внешнего управления процессом передачи могут привлекаться внешние наземные абоненты, подключенные через Интернет [5, 6].

Научно-техническая задача проекта и направления исследований

Одной из важных проблем организации описанной выше системы связи является необходимость снижения времени задержки сигнала. Требование малой задержки сигнала исключает возможность использования развитой спутниковой связи на основе группировки спутников с высотой орбиты около 35786 км. При известной скорости распространения электромагнитных сигналов (в том числе лазерных лучей) прохождение сигнала по маршруту «Земля – геостационарный спутник – Земля» займет не менее 0,24 секунды, а реально с учетом расстояния между наземными данными точки передачи и приема на несколько тысяч километров и неизбежная задержка оборудования спутников и наземных подразделений займет около секунды. Эта задержка затрудняет использование спутниковой связи на геостационарных спутниках в различных службах реального времени, включая дистанционное управление группировки БПЛА.

Основным способом уменьшения временной задержки передачи сигналов управляемым роботам является построение системы передачи данных с использованием формирования низкоорбитальных малых спутников. К такому же выводу пришли исследователи других стран. В частности, хорошо известно об успехах, достигнутых в запуске наноспутников совместно с коллегами из IFAC Aerospace TC в Германии (проф. К. Шиллинг), Японии (проф. С. Накасука) и Франции (проф. Д. Алазар). Аппараты были выведены на орбиты с высотой 400–600 км, что минимизирует указанную выше задержку [10]. Проведенное исследование показало, что для размещения на спутнике полного набора аппаратуры управления орбитальным и угловым движением ограничения по весу спутника должны быть более мягкими и следует учитывать допустимую массу 15 кг. Особенностью разрабатываемого в проекте микроспутника является наличие всего одной направленной приемно-передающей антенны с шириной диаграммы направленности около 10°. Эта антенна в рабочем сеансе должна быть направлена либо на управляемый БПЛА, либо на приемную наземную станцию. Процесс наведения антенны обеспечивается за счет поворота всего спутника на два угла с помощью маховиков, управляемых бортовым компьютером. Расчет правильных углов поворота производится по заранее известным координатам излучателя и приемника. При необходимости можно построить систему высокоточной самонаводящейся антенны с использованием конической развертки малой амплитуды, но при этом точность управления разомкнутым контуром достаточна. Третья координата углового положения спутника может использоваться для управления ориентацией солнечных панелей с целью максимизации вырабатываемой ими мощности [11].

Предполагается, что с одного командного пункта можно управлять n абонентами, $n \geq 1$. В простейшем случае для одного абонента требуется формирование двух низкоорбитальных спутников с антеннами, одна из которых направлена на управляемый объект, а другая – на наземный командный пункт управления. Важно, чтобы расстояние между спутниками не превышало 100 метров. Малое расстояние позволяет организовать широкополосный обмен информацией между спутниками на основе радиосистем без направленных антенн (*Short Range RS*), таких как Wi-Fi. Это дает возможность построить систему двусторонней связи. Конечно, одна пара микроспутников не могла обеспечить длительный сеанс обмена данными между командным пунктом и абонентом из-за орбитального движения спутников с периодом 90–100 мин. Можно рассчитывать только на короткие сеансы продолжительностью около 8 минут, в течение которых оба спутника будут находиться в «прямой видимости». Для обеспечения непрерывной надежной связи количество низкоорбитальных спутников должно составлять несколько десятков. Однако в задаче удаленного управления такой переход принципиально не изменит локальную проблему на глобальную и сеансы связи останутся короткими. Поэтому на текущем этапе исследования примем $n = 1$. Управление движением спутников в группе предполагает решение задач навигации (абсолютной и относительной), ориентации и правильного управления.

На рис. 1 представлена структура используемых информационных каналов связи [8].

Важно, что канал связи «Земля – орбита» должен обеспечивать передачу данных на значительно большие расстояния (для низкоорбитальной группировки – несколько сотен километров), чем канал связи «орбита – орбита» (сотни метров). Также существуют принципиально разные требования к пропускной способности этих типов каналов. Канал связи между спутниками должен обеспечивать значительно более высокие характеристики по сравнению с каналом связи между спутником и Землей, что должно позволять быстро перестраивать космический сегмент [9–15]. Все это требует существенно иных подходов к выбору средств техни-

Рис. 1. Процесс передачи данных между наземными станциями по транзитному каналу связи на базе космического сегмента

ческой реализации каналов связи, которые более подробно рассматриваются в следующем разделе. Из описанной схемы связи очевидно, что во время полета спутника потребуется постоянное изменение ориентации приемо-передающих антенн каналов связи «Земля – орбита» и «орбита – орбита». И если для наземной станции это не представляет принципиальной трудности, то для малого космического аппарата использование дополнительных механизмов перемещения антенны реализовать затруднительно из-за ограничений на габариты и энергоемкость микроспутника.

На основании указанных ограничений было принято решение жестко закрепить антенну на корпусе микроспутника и использовать пространственную ориентацию самого космического аппарата для наведения антенны на наземный объект. Между тем такое упрощение системы связи серьезно усложняет задачи навигации и ориентирования микроспутников. Кроме того, близкое расположение траекторий микроспутников в группе предъявляет дополнительные требования по снижению вероятности столкновения аппаратов друг с другом. Поскольку рассматривается система (формирование) близко расположенных микроспутников (менее ста метров), необходимо обеспечить заданное взаимное расположение космических аппаратов. Эта необходимость обусловлена не только требованиями изменения или сохранения взаимного положения, но и различиями в параметрах орбит близко летящих спутников.

Все это потребовало разработки нового метода определения ориентации одиночного микроспутника. Суть заключается в обработке изображения, полученного с помощью видеокамеры, установленной на соседнем микроспутнике. В этом случае предлагается использовать методы технического зрения.

Для практической отработки метода определения ориентации микроспутника по изображению был изготовлен стенд, включающий макет микроспутника в формате Cubesat и оптическую камеру с системой технического зрения. В наших исследованиях широко используется выделение локального цветового градиента сцены, например, методом сравнительного контрастирования, что позволяет определять и локализовать объекты, не имеющие резких границ и различающиеся в основном по цвету. Для определения граней микроспутника на фотоизображении использовалась библиотека NI IMAQ Vision системы компьютерного зрения в среде LabView. Для выделения краев тела микроспутника используются функции поиска по прямой, реализованные на основе алгоритма Хафа. Алгоритм ищет две горизонтальные и две вертикальные линии. Вершины микроспутника определяются как точки пересечения прямых. Проведенные исследования подтвердили достаточную точность определения расстояния от камеры до макета микроспутника (около 10 мм на расстояниях до 15 м). Но при этом точность определения углов пространственной ориентации оказалась крайне низкой.

А на относительно больших расстояниях до объекта (более 15 м) методы технического зрения оказались совершенно неэффективными. Поэтому исследовательский стенд был модифицирован путем установки на поверхность корпуса модели микроспутника специальных оптических маркеров (светоизлучающих диодов), жестко привязанных к собственным координатам объекта [17–25].

Метод определения пространственного положения одного спутника относительно второго

Основной задачей определения взаимной ориентации [26, 27] микроспутников является измерение относительных углов пространственного расположения координат, привязанных к телам объектов x_1, x_2, x_3 для первого и y_1, y_2, y_3 для второго спутник (рис. 2).

На борту каждого аппарата есть камеры, оснащенные модулем машинного зрения. С их помощью все микроспутники группировки смогут определять взаимную ориентацию и быстро менять свою траекторию (рис. 3).

На корпусах спутников размещены оптические маркеры (инфракрасные светодиоды) для надежного обнаружения на изображении, получаемом с видеокамер соседних спутников.

Для увеличения дальности распознавания маркеров их можно размещать на выдвижных элементах микроспутника (солнечных панелях, радиоантеннах), что увеличивает пространственную базу между оптическими маркерами. Для идентификации отдельных маркеров на корпусе спутника, а также для распознавания отдельных близко расположенных спутников на полученных изображениях используется управляемая модуляция режимов работы оптических маркеров и оптимизация ширины угловой апертуры светодиодного излучения.

Ориентация одного спутника относительно другого спутника определяется тремя углами Эйлера. Вычисляются матрицы направляющих

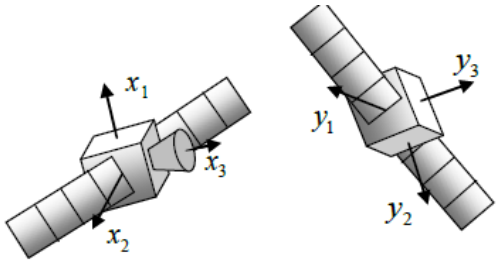


Рис. 2. Схема взаимной ориентации микроспутников

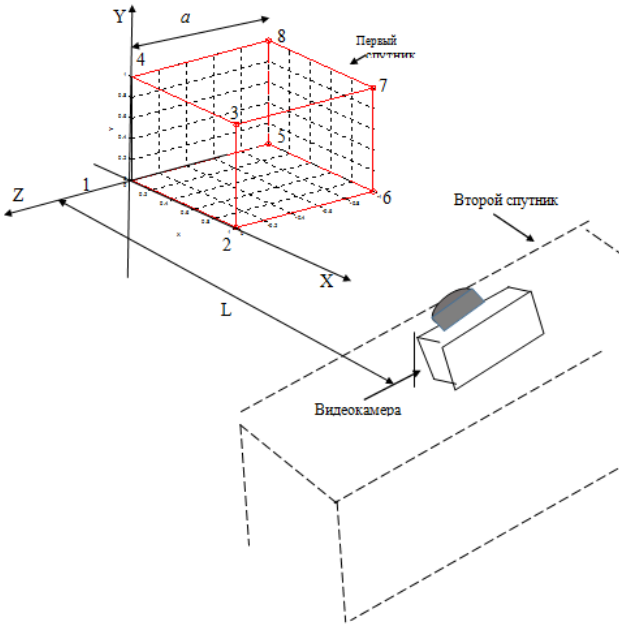


Рис. 3. Схема определения взаимного положения спутников оптико-электронным методом

косинусов при переходе от исходной системы координат *0XYZ* к системе координат, связанной с корпусом спутника.

В качестве метода определения пространственного положения одного спутника относительно второго был выбран метод Efficient-Perspective-n-points. Этот способ позволяет определить положение спутника в трехмерном пространстве по его двумерному изображению [28, 29].

Для определения положения спутника относительно камеры требуется три и более маркера. Если положение этих маркеров на поверхности объекта известно, и эти маркеры также видны на изображении, то по искажениям геометрии можно сделать вывод о положении тела в пространстве.

Можно использовать активные или пассивные маркеры. Активными маркерами являются, например, инфракрасные светодиоды. Чтобы эти маркеры можно было использовать, на них должна быть передана энергия. Пассивные маркеры – это маркеры, для работы которых не требуется энергия. Примером пассивного маркера является qr-код.

Рассматриваемый метод основан на уравнении:

$$s \cdot p = A\left[\frac{C}{t}\right] P_W, \qquad (1)$$

где s – масштабирование проективного преобразования (не зависит от параметров видеока-

меры, определяется дистанцией между аппаратом и камерой, а также матрицами поворота и смещения); p – координаты $[u, v, 1]$ пикселя в плоскости изображения; A – внутренняя матрица камеры; C – поворот системы координат относительно мировой системы координат; t – смещение системы координат относительно мировой системы координат; P_w – точка в пространстве, выраженная относительно мировой системы координат.

Внутренняя матрица видеокамеры описывает ее параметры и имеет следующую структуру [2]:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где f_x, f_y – фокусные расстояния видеокамеры по двум осям; c_x, c_y – главные точки (ближе к центру изображения).

Чтобы обеспечить более высокую точность измерений, свойства камеры должны рассчитываться с высокой точностью. Это можно сделать в соответствии со следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x\left(\frac{X_{ci}}{Z_{ci}} \cdot \frac{1+k_1r_i^2+k_2r_i^2+k_3r_i^2}{1+k_4r_i^2+k_5r_i^2+k_6r_i^2} + \right. \\ +2p_1\frac{X_{ci}\cdot Y_{ci}}{Z_{ci}^2} + p_2\left(r_i^2+2\left(\frac{X_{ci}}{Z_{ci}}\right)^2\right)+ \\ \left. +s_1r_i^2+s_2r_i^4\right)+c_x \\ f_y\left(\frac{X_{ci}}{Z_{ci}} \cdot \frac{1+k_1r_i^2+k_2r_i^2+k_3r_i^2}{1+k_4r_i^2+k_5r_i^2+k_6r_i^2} + \right. \\ +p_1\left(r_i^2+2\left(\frac{X_{ci}}{Z_{ci}}\right)^2\right)+ \\ \left. +2p_2\frac{X_{ci}\cdot Y_{ci}}{Z_{ci}^2}+s_3r_i^2+s_4r_i^4\right)+c_y \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где i – номер тега (всего 3 и более тега); X_w, Y_w, Z_w – координаты i-й отметки в мировой системе координат; X_c, Y_c, Z_c – координаты i-й отметки в системе координат, связанной с камерой; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6 – коэффициенты радиальной дисторсии в зависимости от камеры; p_1, p_2 – зависящие от камеры коэффициенты тангенциальной дисторсии; s_1, s_2, s_3, s_4 – зависящие от камеры коэффициенты призматической дисторсии; r_i^2 – отношение квадрата расстояния между пикселем маркера на изображении и началом координат изображения и расстоянием до маркера.

Таким образом, две координаты маркера на изображении несут информацию о трех координатах маркера в пространстве. Другими словами, два уравнения в выражении 3 имеют три неизвестные переменные. Для того чтобы система уравнений имела решение, необходимо учитывать следующие уравнения:

$$(X_{C1}-X_{C2})^2+(Y_{C1}-Y_{C2})^2+(Z_{C1}-Z_{C2})^2 = a^2, \quad (4)$$

$$(X_{C1}-X_{C3})^2+(Y_{C1}-Y_{C3})^2+(Z_{C1}-Z_{C3})^2 = 2a^2, \quad (5)$$

$$(X_{C1}-X_{C4})^2+(Y_{C1}-Y_{C4})^2+(Z_{C1}-Z_{C4})^2 = a^2, \quad (6)$$

где a – длина боковой грани квадрата, образованного маркерами.

При выполнении равенств (4), (5), (6) существует только одно решение. Таким образом можно определить положение ведомого спутника. В случае использования другого количества маркеров или их различной геометрии математическая модель усложняется, но принципы остаются неизменными.

На основе полученных зависимостей был изготовлен специальный лабораторный стенд (рис. 4) и разработано специальное программное обеспечение для исследования точности относительной ориентации спутников.

В процессе движения макета микроспутника проводились периодические измерения трех углов взаимной ориентации микроспутника $\Psi = 22{,}2°$, $\vartheta = 44{,}0°$, $\gamma = 61{,}1°$. Предварительные результаты этих исследований приведены на рис. 5–7.

Полученные данные позволяют говорить, что экспериментально подтвержденная точность описываемого оптико- электронного метода не превышает 0,02°. Для дальнейшего увеличения точности измерений углов взаимной ориентации необходимо учитывать влияние следующих факторов:

– Дисторсия – аберрация оптических систем, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по мере удаления отражаемых объектов от оптической оси. Влияние этого эффекта приводит к искажению формы объекта на изображении, искривлению прямых линий [4].

– Монохроматические аберрации – аберрации, вызванные изменением толщины линзы. Лучи света, имеющие одинаковую длину волны и направленные параллельно друг другу, после преломления линзой не концентрируются в фокальной точке, а пересекаются в некоторой области вблизи этой точки.

– Хроматические аберрации – аберрации, вызванные разницей длин волн разных цветов. После преломления линзой лучи света разных цветов не собираются в одной точке. Они пересекаются в районе этой точки.

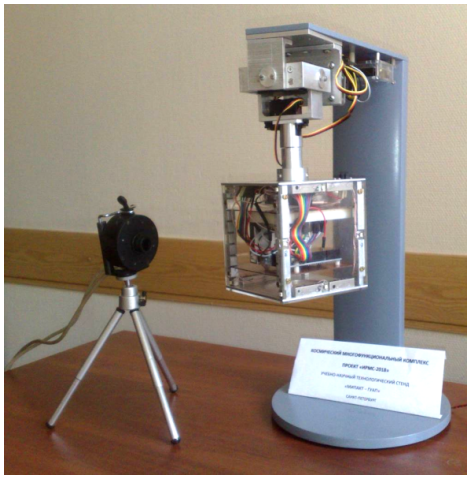


Рис. 4. Лабораторный стенд с автоматизированной системой перемещения макета микроспутника

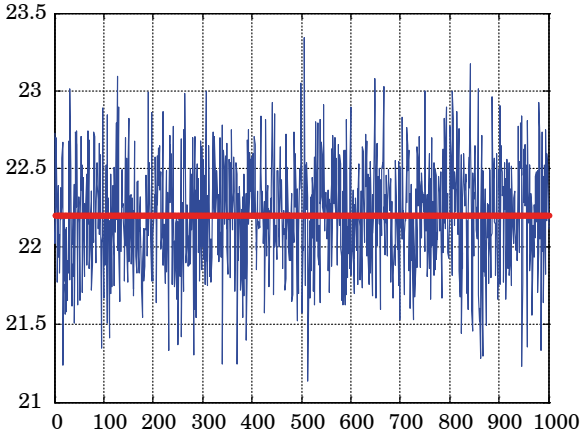


Рис. 5. Погрешность измерений Ψ_m. Действительное значение Ψ = 22,2°. Оценка после 1000 измерений = 22,1999°

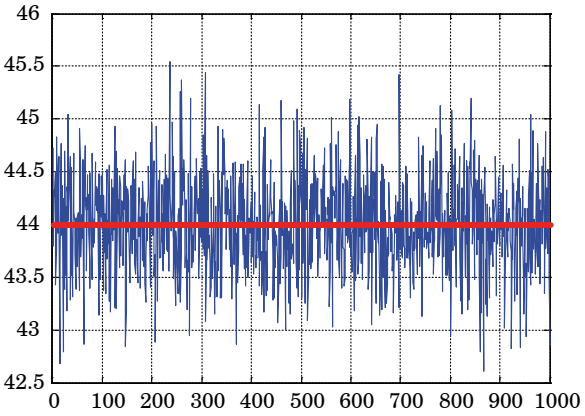


Рис. 6. Погрешность измерений ϑ_m. Действительное значение ϑ = 44,0°. Оценка после 1000 измерений = 44,005°

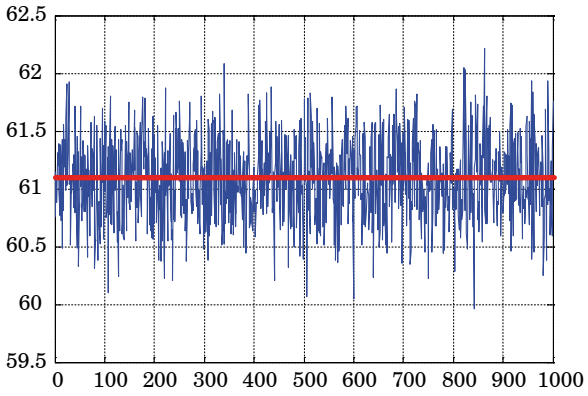


Рис. 7. Погрешность измерений γ_m. Действительное значение γ = 61,1°. Оценка после 1000 измерений = 61,09°

– Погрешности объектива. При изготовлении линз неизбежны дефекты, такие как микроцарапины, дисторсии, искажения формы. На готовом изделии эти дефекты не превышают определенных норм, но их влияние необходимо учитывать для повышения точности результатов измерений.

– Точность определения фокусного расстояния. Для определения положения наблюдаемого объекта относительно видеокамеры в широком диапазоне расстояний необходимо изменять и определять фокусное расстояние видеокамеры с высокой точностью.

– Неточности при размещении маркеров на наблюдаемом объекте.

Можно выделить следующие преимущества использования выбранного алгоритма при решении навигационной задачи для группы спутников:

– Линейная сложность O(n), позволяющая снизить требования к параметрам бортового компьютера и упростить решение задачи оптимизации программного обеспечения спутников. Линейная сложность означает, что время вычислений линейно зависит от количества выполняемых операций. Другие алгоритмы имеют сложность, пропорциональную степеням 8–10.

– Работоспособность при использовании только одной камеры. Для повышения точности результатов измерений и надежности системы могут использоваться две и более камеры, а результаты их измерений программно обрабатываться.

Следующие недостатки использования выбранного алгоритма при решении навигационной задачи для группы спутников:

– Необходимость дополнительной обработки и фильтрации результатов измерений. При

проведении измерения выбранным методом наблюдается отклонение результатов последовательных измерений, достигающее 10%.

– Необходимость определения параметров камеры с высокой точностью. Без учета таких параметров видеокамеры, как дисторсия, дефекты объектива, точность измерений снижается, что приводит к уменьшению диапазона расстояний, на которых можно проводить измерения.

Перспективные задачи для достижения целей исследования

Задачи, которые необходимо решить при продвижении нашего проекта, можно рассмотреть поэтапно, от узкого к более общему. Первоначально для проверки точности метода оптико-электронной системы взаимной ориентации в орбитальном полете предлагается провести эксперимент на орбите с одним микроспутником формата Cubesat 1-U, оснащенным выдвижной платформой для имитации движения соседнего спутника. После этого планируется отработка алгоритмов взаимной ориентации микроспутников и организации комплексной системы группировки микроспутников на 2 и более аппаратов.

Как показано на рис. 9, результаты каждого этапа обеспечивают отдельные элементы бортового приборного оборудования, представляющие собой вложенную систему информационно- вычислительных комплексов, в которой каждый элемент может расширяться для решения все более сложных задач. Кроме того, следует подчеркнуть, что в результате разработанный комплекс может быть рекомендован для использования в качестве универсального бортового оборудования, устанавливаемого на микроспутник. Это обеспечит взаимную ориентацию микроспутников в группе, при которой задача управления ими становится децентрализованной. Каждый отдельный спутник здесь управляется автономно, подчиняясь единому алгоритму, что позволяет поддерживать пространственно-распределенную систему микроспутников в группе.

Благодаря помощи, которую специалисты ЦНИИМАШ оказали нашей команде при разработке нашего проекта, в рамках конкурса отраслевых акселераторов цифровых технологий госкорпорации «Роскосмос» в 2021 г. были выявлены и устранены узкие места проекта и подготовлена готовность к переходу к этапу реализации был обеспечен. В результате первоначальный проект был отработан до уровня, позволяющего в ближайшее время организовать

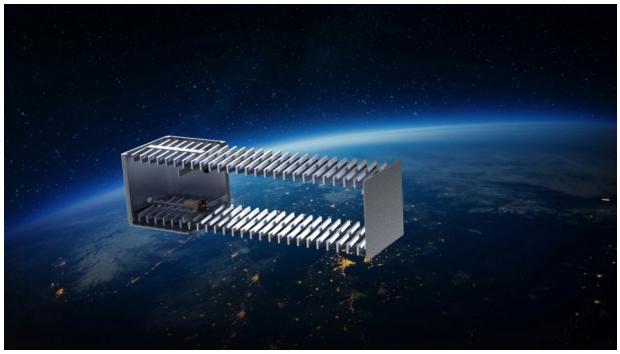


Рис. 8. Экспериментальная выдвижная платформа

собственный орбитальный эксперимент на малом космическом корабле с целью подтверждения важных технических характеристик предлагаемой оптико-электронной системы взаимной ориентации.

В качестве первого орбитального эксперимента для проверки точности рассматриваемого метода предлагается провести эксперимент на орбите с одним микроспутником формата Cubesat 1-U, оснащенным выдвижной платформой для имитации движения соседнего спутника. Конструкция выдвижной системы показана на этом слайде. В ходе эксперимента платформа с оптическими маркерами выдвинута относительно видеокамеры на расстояние 1910,25 мм (рис. 8).

Заключение

Благодаря помощи, которую специалисты Сколково и ЦНИИМАШ оказали нашей команде при разработке нашего проекта, в рамках конкурса отраслевых акселераторов по цифровым технологиям в 2021 г. были выявлены и устранены узкие места проекта и готовность обеспечить реализацию следующего этапа. В результате первоначальный проект был отработан до уровня, позволяющего в ближайшее время организовать собственный орбитальный эксперимент на малом космическом корабле с целью подтверждения важных технических характеристик предлагаемой оптико-электронной системы взаимной ориентации.

Библиографический список

1. *Nebylov A., Perliouk V., Alhatim O., Hu X.* Research of electrocapacitive sensor for detection of leakages system aboard micro-satellite // Workshop on Advanced Control and Navigation for Autonomous Aerospace Vehicles, Seville, Spain. 2015. P. 91–96.

2. Aerospace Navigation Systems / Ed. A. Nebylov & J. Watson. Wiley, 2016.

3. *Schilling K., Pranajaya F., Gill E., Tsourdos A.* Small satellite formations for distributed surveillance: System design and optimal control considerations // NATO RTO Lecture Series SCI-231. 2011.

4. *Небылов А. В., Перлюк В. В., Ху Сяоян.* Опыт разработки бортовых систем макетов микроспутников в рамках международных научно-образовательных программ // Изв. вузов. Приборостроение. 2018 Т. 61. № 8. С. 685–690.

5. *Небылов А. В., Перлюк В. В., Леонтьева Т. С.* Исследование технологии взаимной навигации и ориентации малых космических аппаратов в группе // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 1. С. 88–93.

6. *Aykut Uctepe*, *Resul Dagdanov*. CanSat 2019 Critical Design Review (CDR). Istanbul Technical University. 2019.

7. *Morale*, *Joshua J.*, *Khalif*, *Joe*, *Abdallah Ali A.*, *Ardito Christian T.*, *Kassas Zak M.*, Inertial Navigation System Aiding with Orbcomm LEO Satellite Doppler Measurements. Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). Miami, Florida. September 2018. P. 2718–2725.

8. *Nebylov A. V.* Aerospace Sensors. Momentum Press. NY, USA, 2013. 350 p.

9. *Nebylov A. V.* et al. Verification of the relative distance measurement method for pico- satellites in constellation. IFACPapers – Online. Vol. 51. № 12. P. 100–105.

10. *Nebylov A., Nebylov V., Panferov A.* Concept of high-precision relative navigation of micro-satellites in their formation // 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). Rome, Italy. 20–22 June. P. 187–191.

11. *Nebylov A., Panferov A., Brodsky S.* Relative navigation and control of nano-satellites in formation // 4th International Conference and Exhibition on «Satellite & Space Missions». Rome, Italy. P. 50.

12. *Panferov A. I., Nebylov A. V., Brodsky S. A., Knyazhsky A. Yu.* Synthesis of a control and navigation system for collection a group of small satellites / College Park: AIP Conference Proceedings. Vol. 2046. №. 1. 8 p.

13. *Panferov A. I., Nebylov A. V., Brodsky S. A.* Algorithm for relative navigation and control systems for closely spaced satellite in a group // 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). Rome, Italy. 20-22 June. P. 181–186.

14. *Skrypnyk I., Lowe D. G.* Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features. In International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Arlington, VA. 2004. P. 110–119.

15. Complete Solution Classification for the Perspective-Three-Point Problem / Gao, Xiao-Shan; Hou, Xiao-Rong; Tang, Jianliang; Cheng, Hang-Fei. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2003. P. 930–943.

УДК 351.814:614.8.01

А. П. Ротов*
магистрант
А. Ю. Княжский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВНЕДРЕНИЕ СРЕДСТВ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ В ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Современные тренажерные комплексы управления воздушным движением (УВД) имеют существенный недостаток, который может являться критическим в определенных условиях. Данным недостатком является наличие в схеме тренажера УВД пилота-оператора. Недавние достижения в технологиях автоматического распознавания речи и понимания естественного языка открыли путь к потенциальному использованию данных средств в различных системах области управления воздушным движением, а именно в тренажерных комплексах УВД. В статье предложен принцип использования средств распознавания речи в тренажерных комплексах УВД для достижения наилучших результатов.
Ключевые слова: *управление воздушным движением, распознавание речи, голосовое управление, тренажерная подготовка.*

A. P. Rotov*
Postgraduate Student
A. Yu. Knyazhsky*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

IMPLEMENTATION OF SPEECH RECOGNITION TOOLS IN AIR TRAFFIC CONTROL A TRAINING COMPLEXES

Modern air traffic control a training complexes have a significant drawback, which can be critical in certain conditions. This disadvantage is the presence of a pilot operator in the ATC simulator scheme. Recent advances in automatic speech recognition and natural language understanding technologies have opened the way to the potential use of these tools in various air traffic control systems, namely in ATC training complexes. The article proposes the principle of using speech recognition tools in ATC training complexes to achieve the best results.
Keywords: *air traffic control, speech recognition, voice control, simulator training.*

Введение

Ключевым аспектом в деятельности структур организации воздушного движения является профессиональная кадровая подготовка специалистов служб управления воздушным движением. Для решения этой задачи используются комплексные системные тренажеры управления воздушным движением (КСТ УВД), которые обеспечивают подготовку авиадиспетчеров на всех возможных рабочих местах системы УВД. Использование тренажерных комплексов в обучении специалистов УВД обусловлено важностью именно практической части подготовки специалистов данной области. Поскольку именно во время этой части обучения, обучающиеся получает реальные практические навыки взаимодействия со сложными системами УВД. Тренажерные комплексы уменьшают порог вхождения обучающегося специалиста в область реальной работы. Кроме того, тренажерные комплексы УВД часто используются и действующими специалистами, в целях повышения квалификации и после длительных перерывов в работе.

Структура тренажерного комплекса УВД

Классическая схема тренажерного комплекса УВД включает в себя 4 основных компонента:

1) КСА УВД – комплекс средств автоматизации управления воздушным движением;

2) КСТ УВД – комплексный системный тренажер;

3) АРМ П-О – автоматизированное рабочее место пилота-оператора;

4) АРМ РО – автоматизированное рабочее место руководителя обучения.

Типовая структурная схема тренажерного комплекса УВД представлена на рис. 1.

Однако у классических тренажерных систем существует определенный ряд недостатков. К одному из важнейших недостатков стоит отнести необходимость использования в обучении пилотов-операторов. Основная задача пилота-оператора состоит в ведении радиообмена с обучающимся, моделировании воздушной обстановки (отвечает за динамическое изменение обстановки) путем реакции на команды обучающегося авиадиспетчера. Наличие пилот-оператора в структуре тренажерного комплекса УВД является недостатком в связи с вытекающими из этого издержками, а именно высокой стоимостью обучения и сложностью постоянной поддержки полной работоспособности тренажерного комплекса, ведь необходимо иметь штат специально обученных специалистов. Если же говорить о подготовке авиадиспетчеров военного назначения (офицеров боевого управления), то вопрос содержания кадровых пилотов-операторов является ключевым минусом в современной схеме тренажеров УВД.

Кроме недостатков, описанных выше, существует проблема, связанная с субъективным фактором в процессе обучения. В 2008 г. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) внедрила в структуры УВД новые требования об уровне владения английским языком в процессе радиообмена. Принятие этого решение было вызвано фактами авиационных происшествий, которые наблюдались до этого решения, однако, встречаются и сегодня. В числе первых происшествий, давших начало этому процессу, принято называть:

– Столкновение в аэропорту Лос-Родеос (Испания) – 583 погибших. Причина – ошибочная интерпретация команд диспетчера.

– Столкновение над Чархи Дадри (Индия) – 349 погибших. Причина – плохое знание английского в процессе радиообмена.

Однако количество авиационных происшествий, в которых плохие навыки радиообмена на английском языке стали если не основным, то сопутствующим фактором, намного больше. В связи с этим, наличие пилота-оператора в процессе обучения может привести к случаям субъективизма в обучении и неверной оценке качества работы обучающегося авиадиспетчера, из-за «привязанности» обучаемого и пилота-оператора.

Модуль голосового управления

Инновационные мультимедийные методы, такие как системы распознавания речи, сегодня находятся в стадии активной разработки и могут быть использованы для различных задач в огромной экосистеме структур организации воздушного движения. Четко определенный командный язык управления воздушным движением или же фразеология, с ее ограниченной структурой, может отлично подходить для систем распознавания речи. Именно так решением проблемы наличия пилота-оператора в тренажерном комплексе УВД может стать система распознавания речи. Система автоматического распознавания речи – автоматический процесс

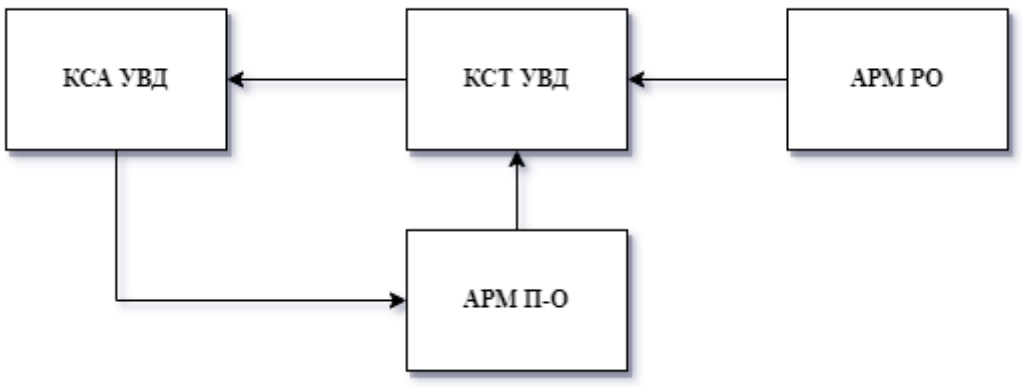


Рис. 1. Структурная схема тренажерного комплекса УВД

преобразования речевого сигнала в цифровую информацию, например, в машиночитаемые текстовые данные. Полученные данные применяют в специальных алгоритмах обработки, специфика разработки которых базируется на конкретном необходимом результате. В управлении воздушным движением радиообмен является основным способом связи между авиадиспетчерами и пилотами. Модуль голосового управления в тренажерном комплексе УВД, основанный на системе распознавания речи, может взять на себя функции пилота-оператора и исключить человека из процесса обучения. Таким образом, процесс радиообмена будем замкнут на автоматическую систему, не требующую накладных расходов. Схема тренажерного комплекса с модулем распознавания речи приведена на рис. 2.

Помимо решения проблемы наличия пилота-оператора в структурной схеме, внедрение в тренажерные комплексы УВД системы распознавания речи может привести к разработке новых видов тренажеров. А именно, процедурных тренажеров и тренажеров для отработки навыков радиообмена. Это нововведение поможет устранить недостатки отработки навыков радиообмена с пилотом-оператором. Процедурные тренажеры могут использоваться для отработки у диспетчера конкретных навыков и умений, например, разведение конфликтных ситуаций с применением высотно-курсовых команд.

Сам процесс распознавания речи в общем случае можно представить в виде следующих этапов:

1. Извлечение акустических признаков из входного сигнала.
2. Акустическое моделирование.
3. Языковое моделирование.
4. Декодирование.

Обобщив эти этапы, можно сказать, что распознавание речи осуществляется за счет сравнения исследуемого сигнала с набором определенных акустических моделей. Наиболее популярной моделью является шаблонная, в ней сопоставляются различные варианты произношения слова и модель состояний, где сравнение происходит с набором звуков, который выбирается согласном определенным правилам. В результате получаются несколько вариантов последовательностей, которые наиболее соответствуют выходным данным. Непосредственной основой процесса распознавания являются алгоритмы сравнения входных данных с эталонными. Данные алгоритмы, как правило, основываются на искусственных нейронных сетях (ИНС) и скрытых марковских моделях (СММ).

На сегодняшний день существует определенное множество готовых средств распознавания речи, основанных на различных концепциях, и имеющих довольно высокое качество распознавания речи. Однако в рамках этой статьи мы рассмотрим только те средства, которые можно использовать в рамках глобального импортозамещения в России.

Например, к такому инструменту можно отнести программное обеспечение Yandex Speech Kit, разработанное российской ИТ-компанией Яндекс. Yandex Speech Kit является продуктом двойного назначения – он может быть использован не только в целях распознавания речи, но и для синтеза. Данный программный продукт обладает высоким качеством распознавания голоса и синтеза речи, однако имеет существенный для сферы управления воздушным движением недостаток – работа через интернет-протокол. Другими словами, взаимодействие пользователя и продукта основано на передаче определенных HTTP-запросов к серверу и получении ответов от него. Данная концепция с трудом может найти реализацию в тренажерных комплексах УВД, поскольку комплекс должен обладать автономностью и самодостаточностью. Од-

Рис. 2. Структурная схема тренажерного комплекса УВД с модулем голосового управления.

нако данный сервис может быть пригоден для других решений в сфере управления воздушным движением.

Помимо продуктов отечественной разработки, можно обратить внимание на разработки с открытым исходным кодом (Open Source проекты). Данные проекты можно использовать в качестве базовых модулей, дополняя их по мере необходимости. Среди систем распознавания речи с открытым исходным кодом наиболее высокую точность обеспечивает Kaldi [5]. Kaldi является одной из ведущих систем распознавания речи с открытым исходным кодом и с точки зрения используемых в ней алгоритмических подходов, и структур данных, поскольку в ней используются самые современные методы распознавания речи, такие как искусственные нейронные сети, скрытые марковские модели, гауссовские смеси и т. п. Данная система разработана на языке программирования C++, и поэтому она имеет хорошую скорость работы. Кроме того, Kaldi имеет модульную архитектуру, что дает отличные возможности для доработки, масштабирования и отладки системы.

Эффективность голосового модуля управления, при внедрении его в тренажерный комплекс УВД, напрямую зависит от точности распознавания речи, используемой системой. Для потенциального повышения точности работы модуля распознавания речи тренажерного комплекса УВД можно предложить два метода. Первый метод – ограничение словаря, используемого системой распознавания. Второй – использование контекстного анализа на этапе обработки данных, полученных системой распознавания речи.

Поскольку управление воздушным движением – это сложный процесс, в котором могут возникать те или иные неоднозначности и недопонимания, то в данной сфере существует своя, строго определенная фразеология. Это значит, что каждое сообщение, передаваемое в сеансах связи, должно иметь строго определенный вид. Данное условие отлично вписывается в метод ограничение словаря, используемого системой распознавания речи. Для исполнения этого метода необходимо сформировать строго определенный перечень слов, которые могут использоваться в радиообмене. Таким образом, мы можем упростить работу системы распознавания, поскольку количество проверок входных данных станет значительно меньше, а результат распознавания – лучше (за счет отбрасывания вариантов созвучных с исследуемым словом).

Стоит отметить, что из рассмотренных выше средств распознавания речи, только библиотека Kaldi может иметь потенциальную возможность ограничения словаря, поскольку пользователю доступен весь исходный код и функционал.

После получения результатов распознавания, в случае их недостаточной информативности, предлагается воспользоваться методом контекстного анализа полученных данных. Для этого необходимо на основе имеющегося словаря составить типовые фразы, которые, как правило, описаны в авиационных правилах. С помощью контекстного анализа мы можем увеличить точность работы модуля голосового управления за счет угадывания пропущенных (нераспознанных) слов, сравнивая их с заранее составленными типовыми фразами. Например, для фразы «CLIMB TO FLIGHT LEVEL THREE ZERO ZERO» мы можем получить на выходе системы распознавания речи результат: «CLIMB _ _ LEVEL THREE ZERO ZERO». Проанализировав этот результат с заранее заготовленными типовыми фразами, мы можем отыскать и восстановить исходную фразу.

Заключение

Таким образом, предлагаемые в статье методы ограничения словаря системы распознавания и использования контекстного анализа полученных данных на основе типовых фраз радиообмена позволят увеличить эффективность работы модуля распознавания речи. Данный модуль может эффективно заменить пилота-оператора в структуре тренажерного комплекса УВД, что обеспечит снижение стоимости тренажерной подготовки. Кроме того, модуль голосового управления может дать развитие процедурным тренажерам, предназначенным для от-

Таблица 1

Пример ограниченного словаря

№	Слово	№	Слово	№	Слово	№	Слово
1.	ZERO	5.	FOUR	9.	EIGHT	13.	DESCEND
2.	ONE	6.	FIVE	10.	NINE	14.	FLIGHT
3.	TWO	7.	SIX	11.	TO	15.	LEVEL
4.	THREE	8.	SEVEN	12.	CLIMB	16.	ALTITUDE

работки конкретных навыков у обучаемых, например, отработка навыков радиообмена. Использование системы распознавания голоса, обученной для работы с английским языком, поможет полностью избавиться от субъективизма в обучении. Обучаемый будет «привязан» не к конкретному собеседнику, а автоматической системе, которая будет интерпретировать его команды исключив «человеческий фактор». Для разработки этого модуля могут использоваться либо уже готовые модули, такие как Yandex Speech Kit, либо библиотеки с открытым исходным кодом («Kaldi» и др.), на основе которых можно разработать полноценный продукт, соответствующий всем необходимым требованиям.

Библиографический список

1. *Иванов А. Ю., Астапов К. А., Плясовских А. П.* Некоторые вопросы построения систем голосового управления в тренажерных комплексах управления воздушным движением гражданской авиации // Научный вестник МГТУ ГА, 2013.

2. *Алешин В. И., Дарымов Ю. П., Крыжановский Г. А.* [и др.] Организация управления воздушным движением / под ред. Г. А. Крыжановского. М.: Транспорт, 1988.

3. *Фролов А. В., Фролов Г. В.* Синтез и распознавание речи // Современные решения. URL: http://www.frolov-lib.ru/books/hi/ch01.html (дата обращения: 12.12.2022).

4. Правила и фразеология на английском языке при выполнении полетов и управлении воздушным движением в воздушном пространстве Российской Федерации. М.: Министерство транспорта РФ. Государственная служба гражданской авиации, 2001.

5. *Беленко М. В., Балакшин П. В.* Сравнительный анализ систем распознавания речи с открытым кодом. 2017. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-sistem-raspoznavaniya-rechi-s-otkrytym-kodom (дата обращения: 06.02.2023).

6. Improving speech recognition models with small samples for air traffic control systems / Y. Lin, B. Yang, Z. Yan et al. // Neurocomputing. 2021. Vol. 445. P. 287-297. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.08.092.

7. *Pellegrini T., Farinas J., Delpech E. et al.* The Airbus Air Traffic Control speech recognition 2018 challenge: towards ATC automatic transcription and call sign detection // Automatic analysis of word association data from the Evolex psycholinguistic tasks using computational lexical semantic similarity measures. Vol. 1. 2019. P. 1–2. DOI: 10.21437/interspeech.2019-1962.

8. *Cordero J. M., Rodriguez N. et al.* Automated Speech Recognition in Controller Communications applied to Workload Measurement // CRIDA, ATM R&D Reference Center, Spain, 2013.

9. *Борисов В. Е., Карнаухов В. А.* Методы формализации тренажерной подготовки диспетчеров управления воздушным движением // Перспективы развития науки и образования: материалы международной научно-практической конференции. Тамбов. 30 декабря 2017 г. С. 16–19.

10. *Борисов В. Е., Борсоев В. А., Губерман И. Б.* Методика построения программно-аппаратного комплекса для подготовки офицеров боевого управления // Организация воздушного движения и безопасность полетов. 2019. № 8. С. 25–27.

11. Проектно-учебная лаборатория экономической журналистики. Say again: почему пилоты и диспетчеры из разных стран не всегда понимают друг друга. URL: https://economics.hse.ru/ecjourn/news/527968622.html (дата обращения: 15.12.2022).

УДК 621.3.087.92

А. С. Сабанов*
магистрант
Р. Н. Малаханов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассматривается задача программно-аппаратной реализации сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя первого порядка с различными диапазонами входных напряжений.
Ключевые слова: *сигма-дельта преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, микроконтроллер.*

A. S. Sabanov*
Postgraduate Student
R. N. Malakhanov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF SIGMA-DELTA ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

The problem of an implementing a Sigma-delta Analog-to-Digital Converter using a microcontroller built-in analog comparator module is considered.
Keywords: *sigma-delta converter, analog-to-digital converter, microcontroller.*

Сигма-дельта модуляция известна своими принципами с 1980-х гг., однако наибольшую актуальность она проявила в последнее время с развитием цифровой техники. Наиболее распространенное практическое использование сигма-дельта модуляции – в устройствах аналого-цифрового преобразования сигналов [1, 2].

В соответствии с программой импортозамещения в авиации можно использовать только отечественные микросхемы. Отечественная промышленность выпускает небольшую номенклатуру микросхем сигма-дельта аналого-цифрового преобразования, при этом каждая микросхема отличается высокой стоимостью. Их применение резко повышает стоимость разрабатываемого устройства, поэтому в некоторых случаях экономически выгодно реализовать сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (СД АЦП) программно на основе микроконтроллера (МК). Это позволяет уменьшить вес разрабатываемого устройств, снизить его стоимость, добиться высокой разрешающей способности измерения напряжения не только в диапазоне напряжения электрического питания МК, но и вне его. Недостатками же данного подхода являются усложнение программного обеспечения и необходимость применения дополнительных пассивных компонентов.

Функциональная схема СД АЦП приведена на рис. 1. Сумматор, аналоговый компаратор, интегратор и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) образуют сигма-дельта модулятор. Помимо этого, выходной сигнал с компаратора передается на цифровой фильтр низких частот, который преобразует одноразрядный поток данных в результат многоразрядного преобразования.

Обычный МК не способен выполнять функцию сигма-дельта преобразования, однако несколько дополнительных внешних компонентов позволяют это сделать возможным. Многие современные МК имеют встроенные модули аналоговых компараторов, на основе которых могут быть построены СД АЦП. В МК серии 1986ВЕ9х производства АО «ПКК Миландр» встроенный модуль аналогового компаратора позволяет программно формировать внутреннюю дискретную шкалу напряжения от напряжения электрического питания МК или от внешнего вывода [3].

Обобщенная функциональная схема СД АЦП на основе МК приведена на рис. 2. Диапазон напряжения входного сигнала для этой схемы определяется резисторами R_1 и R_2 и опор-

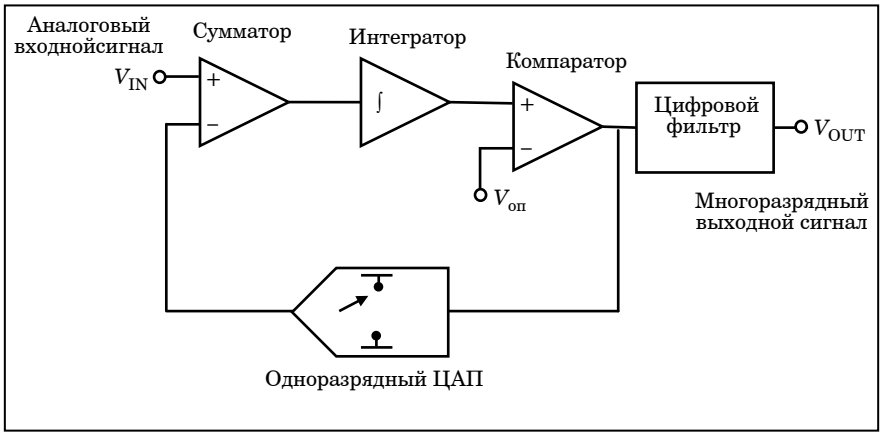


Рис. 1. Функциональная схема СД АЦП первого порядка

ным напряжением на неинвертирующем входе компаратора. Если соотношение между R_1 и R_2 изменяется, входной диапазон преобразователя увеличивается или уменьшается в соответствии с самим соотношением. Дальнейшие настройки подбора входного диапазона могут быть реализованы с помощью дополнительного резистора, добавленного к этой входной структуре, который подключен к земле или источнику электрического питания V_{DD}. В расчете на диапазон 0–3,3В резисторы R_1 и R_2 имеют сопротивление 47 кОм, которое подобрано для минимизации ошибок утечки на резисторах. В данной конфигурации резисторы R_3 и R_4, не устанавливаются.

Функция интегратора сигма-дельта модулятора реализована с помощью внешнего конденсатора C_1. Точность этого конденсатора не столь важна по сравнению с его стабильностью от интегрирования к интегрированию. Номинальное значение емкости конденсатора выбирается равным 0,1 мкФ потому, что конденсаторы с такой номинальной емкостью наиболее часто используются в электронных устройствах в цепях электрического питания микросхем.

Блок-схема алгоритма работы МК приведена на рис. 3. МК реализует функции одноразрядного ЦАП и цифрового фильтра низких частот, который в данном случае выполнен как суммирующий счетчик. Время выполнения

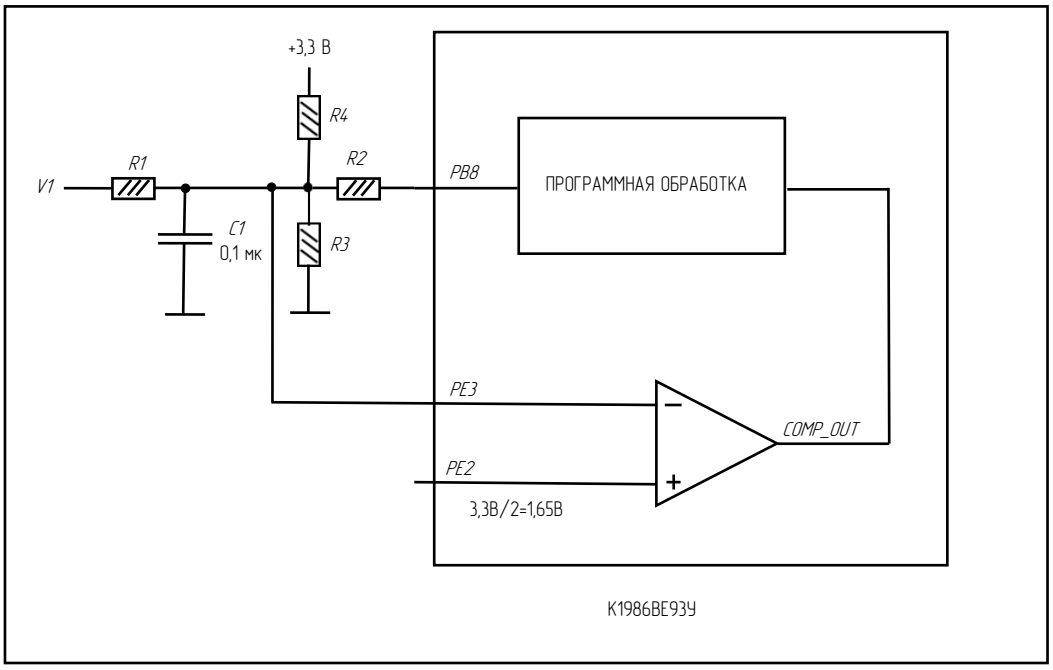


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема СД АЦП на основе МК. PE3 и PE2 – аналоговые инвертирующий и неинвертирующий входы компаратора соответственно

программы $\tau_п$ должно быть меньше постоянной времени RC-цепи τ, потому что на этом интервале времени интегрирование производится линейно. Время аналого-цифрового преобразования составляет $2^N\tau_п$.

В соответствии с методом узловых потенциалов формула (1) описывает схему на рис. 2 для входного диапазона напряжений 0–3,3 В:

$$\frac{V_C - V_1}{R_1} + V_C pC + \frac{V_C - V_2}{R_2} = 0, \quad (1)$$

где V_C – напряжение на конденсаторе; V_1 – входное напряжение; V_{PB8} – напряжение на выводе МК; $1/pC$ – сопротивление конденсатора.

Путем несложных преобразований получим формулу (2), описывающую зависимость напряжения на конденсаторе от входного напряжения и номинальных значений резисторов:

$$V_C\left(1 + p\frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}\right) = \frac{V_1R_2 + V_2R_1}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

При $V_{PB8} = 0$ В последнее выражение совпадает с передаточной функцией апериодического звена первого порядка [4]:

$$\frac{V_C}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 + p\frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{k}{1 + \tau p}, \quad (3)$$

где $k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$; $\tau = \frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}$.

Для диапазона входного сигнала от 2 до 3 В схема подключения резисторов и конденсатора не изменяется по отношению к рассмотренному ранее случаю. Номиналы резисторов подбирают таким образом, чтобы уменьшить диапазон входного напряжения с 0–3,3 В до ±500 мВ. Они определяются путем сравнения желаемого входного диапазона с диапазоном напряжений на *PB*8, который благодаря опорному напряжению переключается между 0 и 3,3 В. Соотношение этих диапазонов напряжений составляет 3,3:1. С учетом того, что токи на резисторах R_1 и R_2 равны, выведем формулу (4), которая позволяет производить выбор номинальных значений сопротивлений резисторов:

$$V_1 = V_{PB8}\left(\frac{R_1}{R_2}\right). \quad (4)$$

Исходя из соотношений диапазонов, примем $R_2 = 3{,}3R_1$.

Математическое описание схемы на рис. 2 на входной диапазон 2–3 В ничем не отличается от описания на диапазон 0–3,3 В.

Для диапазона входных сигналов от 10 до 15 В на рис. 2 подключенный к электрическому питанию резистор R_4 не устанавливается. Номинальные значения резисторов R_1 и R_2, равные соответственно 50 и 33 кОм и рассчитанные по формуле (4), обеспечивают диапазон напряжения входного сигнала от 0 до 5 В. Дополнительный резистор R_3 обеспечивает сдвиг уровня до входного диапазона 10–15 В. Расчет центрирования сигнала произведен по формуле (5):

$$V_{1(\text{ЦЕНТР})} = V_{\text{РЕЗ}}\left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right), \quad (5)$$

где $V_{\text{РЕЗ}}$ – это напряжение, подаваемое на вход компаратора, а $V_{1(\text{ЦЕНТР})} = (V_{1(\text{MAX})} - V_{1(\text{MIN})})/2 + V_{1(\text{MIN})}$. Исходя из формулы (5), примем $R_1 = 4R_3$.

Формула (6) описывает схему на рис. 2 для входного диапазона напряжений 10–15 В:

$$\frac{V_C - V_1}{R_1} + V_C pC + \frac{V_C}{R_3} + \frac{V_C - V_2}{R_2} = 0. \quad (6)$$

Путем несложных преобразований получим выражение:

$$V_C\left(1 + p\frac{CR_1R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}\right) = \frac{V_1R_2R_3 + V_2R_1R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}. \quad (7)$$

В данном случае $\tau = \frac{CR_1R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}$.

Для диапазона входных сигналов от –0,5 до 0,5 В на рис. 2 подключенный к земле резистор R_3 не устанавливается. Используется тот же метод расчета, произведенный по формуле (4). Из этого следует, что достижение входного диа-

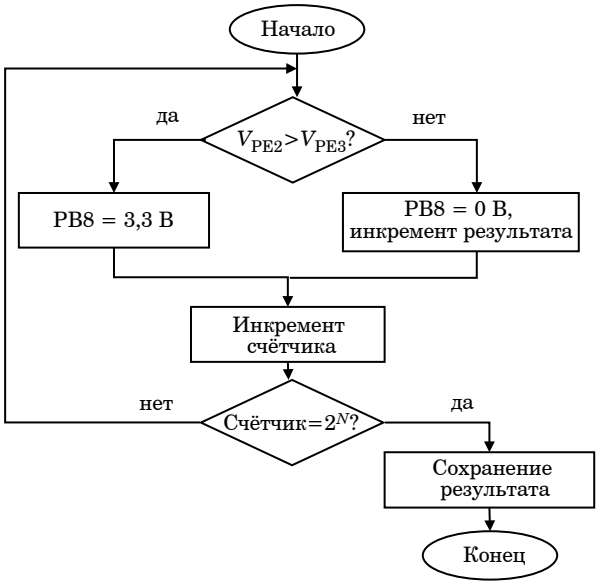


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы МК

пазона +/–500 мВ проводилось за счет равенства $R_2 = 3{,}3R_1$ (33 кОм и 10 кОм соответственно). Затем с помощью резистора R_4, подключенного к источнику электрического питания V_{DD} = 3,3 В, производится сдвиг диапазона входного сигнала по уровню на –2,5 В. Влияние соотношения резисторов R_1 и R_4 при расчете центрирования сигнала около 0 В схоже с расчетом центрирования по формуле (5). Исходя из этого, примем $R_1 = R_4$.

Формула (8) описывает схему на рис. 2 для входного диапазона напряжений –0,5–0,5 В:

$$\frac{V_C - V_1}{R_1} + V_C pC + \frac{V_C - V_{DD}}{R_4} + \frac{V_C - V_2}{R_2} = 0. \quad (8)$$

Путем несложных преобразований получим выражение:

$$V_C\left(1 + p\frac{CR_1R_2R_4}{R_1R_2 + R_1R_4 + R_2R_4}\right) = \frac{V_1R_2R_4 + V_2R_1R_4 + V_{DD}R_1R_2}{R_1R_2 + R_1R_4 + R_2R_4}. \quad (9)$$

В данном случае $\tau = \frac{CR_1R_2R_4}{R_1R_2 + R_1R_4 + R_2R_4}$.

Библиографический список

1. *Schreier R., Gabor C., Temes*. Understanding Delta-Sigma Data Converters. John Wiley & Sons, inc. publication, 2017, 464 p.

2. *Kester W.* ADC Architectures III: Sigma-Delta ADC Basics. MT-022 TUTORIAL. Analog Devices, Inc. Rev.A, 10/08, 12 p.

3. Микросхема 32-разрядного однокристального микро-ЭВМ с памятью Flash-типа 1986ВЕ9xy, К1986 ВЕ9xy, К1986ВЕ92QI, К1986ВЕ92QC, 1986ВЕ91Н4, К1986ВЕ91Н4, 1986ВЕ94Н4, К1986ВЕ94Н4: Спецификация. Версия 3.20.1 от 15.05.2020. АО «ПКК Миландр», 2020.

4. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.

УДК 621.01 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-81-96**

Ху Сяоян*
доктор технических наук, профессор
В. В. Перлюк**
кандидат технических наук, доцент
**Шэньянский политехнический университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ РУЛЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

В данном исследовании фильтр Калмана применяется к пространству состояний системы управления аэродинамических рулей летательного аппарата на основе теории оптимального оценивания. Алгоритм управления рулем направления имеет алгоритм ПИД-регулирования, алгоритм нечеткого управления, алгоритм управления переменной структурой, которые легко реализовать на управляющем компьютере. В данном докладе рассматривается объединение фильтра Калмана, адаптивного фильтра Калмана и системы управления на базе адаптивного контроллера переменной структуры фильтра Калмана. В дальнейшем полученные результаты могут эффективно использоваться для точной оценки, сопровождения и сближения с движущейся целью при высокоточном наведении летательного аппарата на больших расстояниях. Управляющий контроллер переменной структуры фильтра Калмана был разработан путем использования специального алгоритма. Разработана и построена модель управляющего контроллера. Результаты показывают, что такой контроллер обладает отличными характеристиками переменной структуры и обладает уникальными преимуществами управления, что делает систему легко адаптируемой и высоконадежной.
Ключевые слова: *фильтр Калмана; передаточная функция; ошибки измерения; моделирование контроллера.*

Hu Xiaoyang*
Dr. Sc., Tech., Professor
V. V. Perliouk**
PhD, Tech., Associate Professor
**School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

RECEARCH OF ONE KIND FOR AERODYNAMIC RUDDERS USING THE KALMAN FILTER VARIABLE STRUCTURE CONTROLLER

Kalman filter is applied to the state space of the system for the first time on the basis of optimal estimation theory. The control algorithm of the rudder has a PID control algorithm, fuzzy control algorithm, variable structure control algorithm, which is easy to realize by computer. This paper combines Kalman filter, adaptive Kalman filter and variable structure control to design Kalman filter variable structure controller, the adaptive Kalman filter variable structure controller. In the future noisy, complex information battlefield, the accurate estimation, tracking, and hitting of the moving target for precision long-range guidance missile are required. A Kalman filter variable structure controller is designed by introducing a Kalman filter algorithm into a variable structure controller. A Kalman filter variable structure controller is designed and built a model. The results show that the controller maintains the excellent variable structure characteristics and has the unique advantages of Emmerich Kálmán, which makes the system have strong adaptability and robustness.
Keywords: *Kalman filter; Algorithm; Transfer function; Noise interference; Controller simulation.*

Введение

Система управления летательным аппаратом с аэродинамическими рулями представляет собой высокоточную сервосистему позиционирования, которая является ключевой частью системы наведения. Когда контроллер рулевого механизма принимает команду угла отклонения поверхности рулевого управления от усилительного элемента, система может управлять отклонением поверхности рулевого управления или поддерживать рулевую поверхность под ожидаемым углом для управления траекторией полета и ориентацией ракеты путем создания требуемой аэродинамической силы. Таким образом, система может достичь цели точного дис-

танционного управления. Конструкция рулевого управления является ключевой технологией для обеспечения высокодинамичного полета летательного аппарата, точности наведения и устойчивости в полете, что формирует в целом статические и динамические характеристики летательного аппарата [1–3].

Электрический рулевой привод для различных, в том числе беспилотных летательных аппаратов, был глубоко изучен в различных аспектах, но особенности методов его реализации в последние годы активно исследуются. Обычно они включают два алгоритма.

Первый – это алгоритм адаптивного управления, обладающий возможностями самокоррекции. Он имеет хорошую адаптируемость при изменении параметров системы не обязательно изменяет структуру.

Второй – это алгоритм управления переменной структурой, который имеет лучшую надежность, чем традиционные алгоритмы управления. Он может обеспечить сложные процессы функционирования сервосистемы о облегчить решение задачи движения летательного аппарата по заданной траектории, поэтому алгоритм контроллера переменной структуры имеет хороший эффект подавления изменения параметров системы управления или случайных внешних помех.

В современных приложениях теории управления фильтр Калмана играет очень важную роль. В целом он представляет собой рекурсивный алгоритм, работающий в реальном времени с минимальной среднеквадратической ошибкой в качестве критерия оценки. В случае помех измерителей и регулярных внешних помех фильтр Калмана может эффективно подавить помехи посредством оценки, прогнозирования и коррекции, а далее сформировать улучшенный полезный сигнал. Но в системе управления рулем направления решающую роль играет выбранная стратегия формирования траектории полета летательного аппарата. При этом ее основная роль состоит в обеспечении точного отслеживания положения летательного аппарата на траектории. Далее алгоритм управления должен оценивать значение текущего состояния объекта управления на основе предыдущих его состояний и текущего прогнозируемого и оценочного состояния. Такие алгоритмы используются в спутниковой навигации, траекторном управлении беспилотных летательных аппаратов, отслеживании и позиционировании целей и т. д. [4–9].

После десятилетий непрерывного совершенствования теория фильтра Калмана была применена к другим продвинутым алгоритмам, таким как адаптивный фильтр Калмана, разработанный совместно с адаптивной теорией, расширенный фильтр Калмана, общая фильтрация Калмана и т. д. [10]. Эти улучшенные алгоритмы значительно расширили область применения фильтра Калмана. С развитием электронных технологий и компьютеров текущие потребности в точности отслеживания траектории целей, точности оценки состояния летательного аппарата, точности наведения стали приоритетными направлениями исследований. Превосходные характеристики фильтра Калмана в этом вполне удовлетворяют современным требованиям.

На основе алгоритма ПИД-управления, алгоритма управления наведения с переменной структурой, алгоритма наведения нечеткой переменной структурой и алгоритма фильтра Калмана, в соответствии со сложностью и факторами неопределенности ситуации, связанными с выполняемой полетной задачей, в сочетании с развитием общей теории Калмана, был разработан алгоритм переменной структуры фильтра Калмана, и далее усовершенствован адаптивный алгоритм. Получен алгоритм адаптивного фильтра Калмана переменной структуры, что также подтвердило его превосходные характеристики.

Предмет этого доклада – включить фильтр Калмана в переменную структуру скользящего режима оценки измерений и разработать контроллер переменной структуры фильтра Калмана в сложной и изменчивой среде в будущем, нацеленный на компенсацию ошибок измерения или других сигналов. Порядок работы такой:

1. Модель системы управления полетом летательного аппарата изменяется.

2. Адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана формирует необходимую структуру.

3. Строится комбинированная модель системы управления летательным аппаратом.

4. Проводится новый цикл моделирования.

Результаты исследования подтверждают, что производительность контроллера, описываемого в данном докладе, значительно улучшена по сравнению с традиционным классическим контроллером, что повышает надежность системы рулевого механизма.

Используемая модель фильтра Калмана

Теория фильтра Калмана может применяться как к линейным системам с непрерывным временем, так и к линейным системам с дис-

кретным временем, где добавляются внешние случайные возмущения и шумы. Передаточная функция линейной непрерывной системы исполнительных механизмов может быть дискретизирована в следующее линейное дискретное уравнение моделей состояния:

$$\begin{cases} x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\ z_k = Hx_k + v_k \end{cases}, \quad (1)$$

где x_k – системная N-мерная оценочная переменная состояния системы; A – $n \times n$-мерная матрица переходов состояний системы; B – матрица усиления $n \times l$-мерного управляющего воздействия; w_k, ν_k – матрица шума процессов в системе L-размерности и матрица шума измерений M-размерности соответственно.

Предположим:

$$\begin{cases} E(w_k) = 0, E(v_k) = 0 \\ E(w_k v_j^T) = 0, E(w_k w_j^T) = Q\delta_{kj}, E(v_k v_j^T) = R\delta_{kj} \end{cases}, \quad (2)$$

где z_k – измерительная переменная системы m-размерности; H_k – матрица измерений m-размерности; B – матрица усиления $n \times l$-мерного управляющего воздействия; w_k, ν_k – матрица шума процессов в системе L-размерности и матрица шума измерений M-размерности соответственно; R – неотрицательная матрица дисперсии шума процесса в системе; Q – симметричная, положительно определенная дисперсия наблюдаемого шума в системе; δ_{kj} – δ-функция Кронекера;

Переменная u_k представляет собой элемент управления с переменной структурой для скользящего режима. Когда ограничения и допущения приведенных выше уравнений выполняются, приведенное ниже уравнение является стохастическим линейным дискретным базовым уравнением фильтрации Калмана во времени одноэтапного прогнозирования состояния переменных состояния:

$$\hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}. \quad (3)$$

Используя это уравнение, мы можем вывести следующее прогнозируемое значение величины состояния системы из оцененного значения фильтра Калмана, которое является оценочным значением фильтра Калмана для значения состояния системы. Его значение оценивается по системным наблюдениям в это время. Оценка состояния может быть представлена как:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k,k-1}), \quad (4)$$

где $\hat{x}_k$ является оценочным значением переменной состояния системы x_k, которое вычисляется из одношагового предсказанного значения переменной состояния системы $\hat{x}_{k,k-1}$ и наблюдаемого значения z_k системы. Где определяется $\hat{z}_k$ как новая процентная последовательность и в сочетании с уравнением измерения системы может быть записана:

$$\begin{aligned} \tilde{z}_k &= z_k - H\hat{x}_{k,k-1} = Hx_k + v_k - H\hat{x}_{k,k-1} \\ &= H(x_k - \hat{x}_{k,k-1}) + v_k, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{x_k} - \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{k,k-1}}$ – ошибка одношагового прогнозирования переменной состояния системы x_k, и ее функция основная информация для системы для проведения оценки Калмана. Матрица усиления фильтра:

$$K_k = P_{k,k-1}H^T(HP_{k,k-1}H^T + R_k)^{-1}, \quad (6)$$

где R_k – матрица среднеквадратичной ошибки шума системного наблюдения ν_k.

При увеличении значения R_k, значение K_k соответственно уменьшится. Интуитивно понятно, что когда шумовые помехи велики, ошибка новой информации увеличивается, и значение усиления фильтрации K_k должно быть меньше, чтобы гарантировать, что шумовые помехи наблюдения будут иметь небольшое влияние на значение фильтрации. Пиковое значение ковариации ошибки одношагового прогнозирования:

$$P_{k,k-1} = AP_{k-1}A^T + BQ_kB^T, \quad (7)$$

где $P_{k,k-1}$ – матрица среднеквадратичной ошибки одношагового прогнозирования, которая выводится из дисперсии системных шумовых помех и матрицы среднеквадратичной ошибки.

Ковариационная матрица ошибок оценки:

$$\begin{aligned} P_k &= [I - K_kH]P_{k,k-1}[I - K_kH]^T + K_kR_kK_k^T; \\ &= (I - K_kH)P_{k,k-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Фильтрация Калмана обычно делится на две части: уравнение времени и уравнение обновления измерения. Уравнение обновления времени предназначено для расчета состояния системы в следующий раз путем оценки текущего состояния и ковариации ошибок, а также для априорной оценки состояния системы в следующий раз. Функция уравнения (2) такова: система может прогнозировать оценочное значение переменной состояния в данный момент времени k в соответствии с оценочным значением переменной состояния x_k в данный момент времени k–1. Уравнение (3) используется для количественного описания переменной состояния x_k и прогнозирования ее значения $\hat{x}_k$.

Уравнения (2) и (3) используются для периодического прогнозирования состояния системы. Это и является фильтрацией Калмана. Уравнения (2) и (3) используются в основном для оценки значений состояния системы. Функция уравнения восстановления измерения состоит в формировании апостериорной оценки путем сравнения априорной оценки обратной связи с новой переменной измерения. Уравнения (4) – (6) используется для исправления ошибки прогнозируемого значения, и оно в основном определяется информацией наблюдения z_k, $P_{k,k-1}$, качеством обновления во времени R_k, качеством переменной наблюдения и взаимосвязью между информацией наблюдени и состоянием системы H. Этот процесс является процессом восстановления наблюдения.

Алгоритм фильтра Калмана рекурсивно вычисляет уравнение времени и уравнение обновления измерения, а апостериорные оценки, полученные из последнего вычисления, используются в качестве предварительных оценок для следующего вычисления, поэтому фильтр Калмана имеет значительные преимущества при оценке, вычислении и в процессе проверки учитываются только прошлое состояние, текущее состояние и измеренное значение на данный момент. На рис. 1 представлена диаграмма рабочего процесса фильтра Калмана.

Моделирование фильтра Калмана

Когда система рулевого управления возмущается шумом, вводится алгоритм фильтра Калмана. На рис. 2 показана система управления при добавлении технологического шума w_k и шума ν_k [11].

Передаточная функция системы рулевого управления упрощена, и ее параметры дискредитированы следующим образом:

$$A = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.006 \\ 0 & 0.2926 \end{bmatrix}; \; B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0656 \end{bmatrix}; \; H = [1,0].$$

В алгоритме фильтра Калмана используются параметры $Q = 10$, $R = 10$. Моделирование системы с помощью модуля симуляции s-функции, параметры контроллера с переменной структурой:

$$C = 65, \varepsilon = 30, q = 800.$$

Модуль моделирования регулятора переменной структуры на основе экспоненциального фильтра Калмана показан на рис. 3.

Как показано на рис. 4–11, при добавлении ступенчатого сигнала амплитуды 1°, сигнала амплитуды 1°, синусоидального сигнала 10 Гц, шума процесса и измерения, контроллер с переменной структурой без алгоритма фильтра Калмана и контроллер с переменной структу-

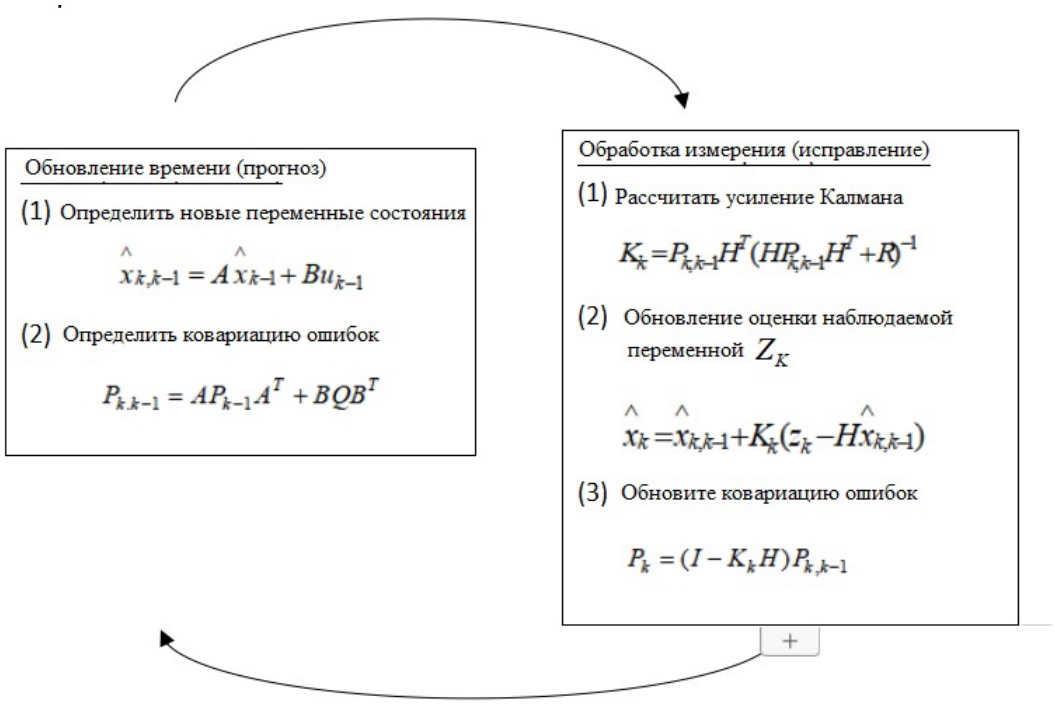


Рис. 1. Принцип работы алгоритма фильтрации Калмана

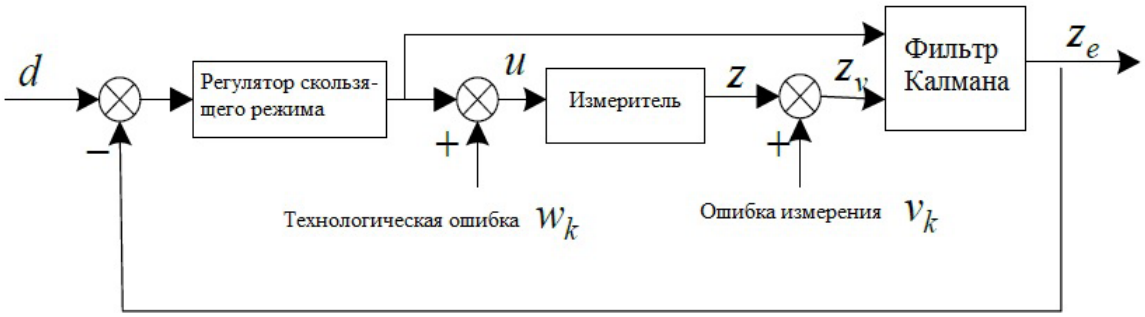


Рис. 2. Система управления фильтрацией Калмана с переменной структурой

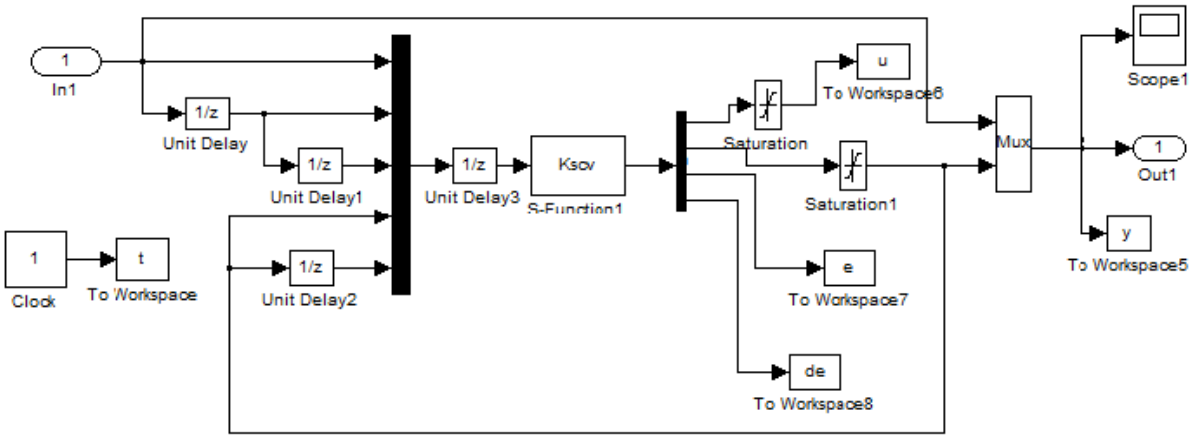


Рис. 3. Модель регулятора с переменной структурой на основе фильтра Калмана

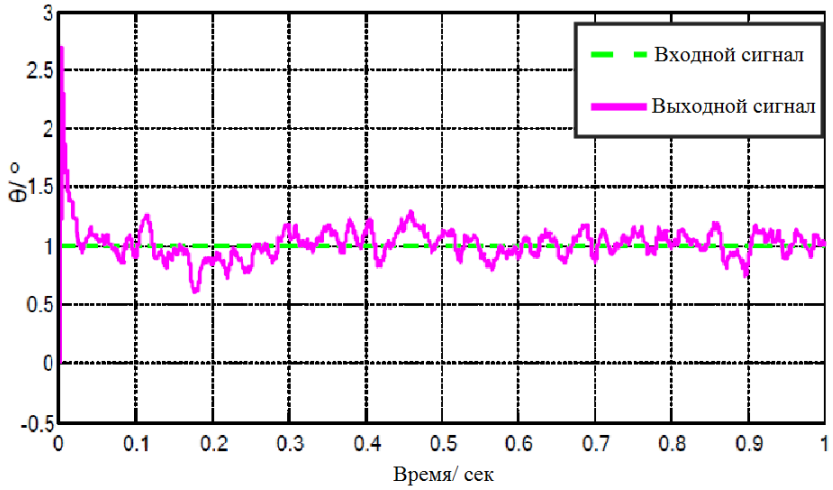


Рис. 4. Контроллер с переменной структурой без фильтра Калмана

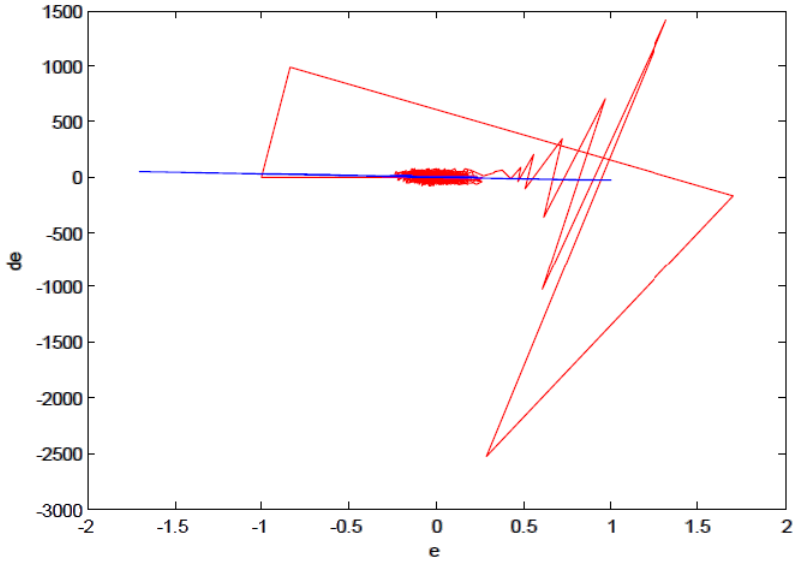


Рис. 5. Фазовый сдвиг переменной структуры скользящего режима, S-движение

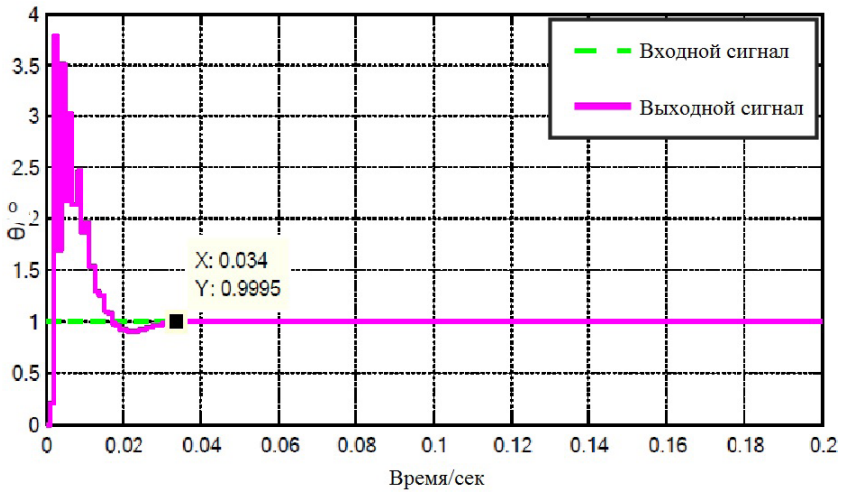


Рис. 6. Регулятор переменной структуры на основе фильтра Калмана

рой фильтра Калмана соответственно моделируются.

Установка параметра: шум процесса в пределах [–0,3, 0,3], ν_k сигнал белого шума в пределах –0,3, 0,3].

Результаты моделирования на рис. 4 и 5 показывают, что контроллер с переменной структурой может ограничивать влияние шумовых помех на управляемый объект, когда система управления достигает стабильного состояния за короткое время, но его движение явно нестабильно. Выходной сигнал системы колеблется между амплитудами 1,5 и –0,5 вместе с возмущением. [12–15]. В то же время движение переменной структуры скользящего режима постепенно приближается к установленной поверхности переключения из начального состояния, чтобы достичь стабильного состояния, работа движущейся дорожки значительно перемещается вверх и вниз по заданной дорожке. Усиливается вибрация переменной структуры, что делает работу системы нестабильной. Таким образом, для сервосистемы с высокоточным отслеживанием положения контроллер переменной структуры не имеет значения для сервосистемы при случайном возмущении.

Результаты моделирования на рис. 6 и 7 показывают, что перерегулирование регулятора $\sigma = 380\%$, время настройки $t = 0{,}034$ сек., а ошибка устойчивости системы составляет 0,08%.

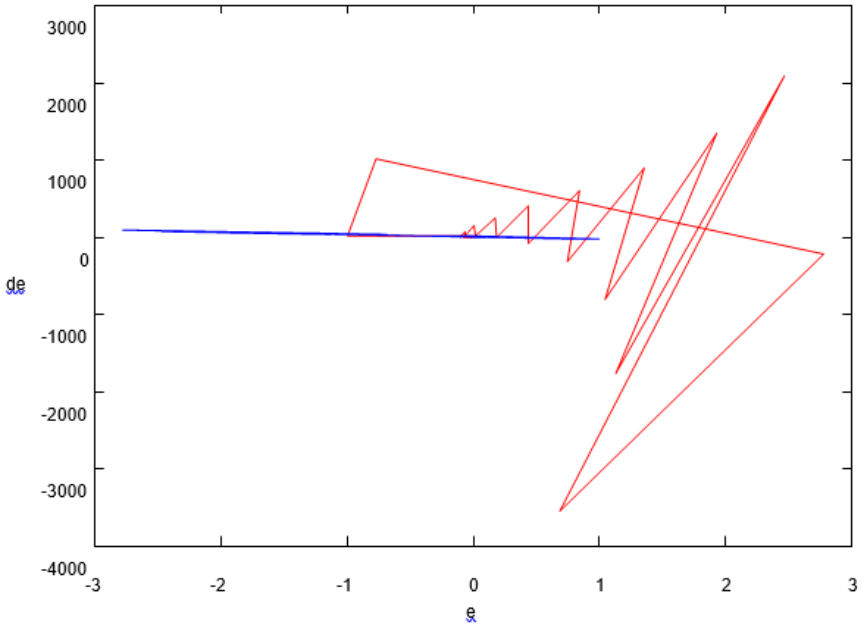


Рис. 7. Фазовый сдвиг скользящего режима фильтрации Калмана

В случае внешнего возмущения регулятор переменной структуры без алгоритма фильтра Калмана не может обеспечить точное управление, когда система достигает устойчивого состояния.

После введения алгоритма фильтра Калмана контроллер эффективно ослабляет случайные возмущения, и движение в скользящем режиме может быстро достигать поверхности переключения из начального состояния, а фазовый сдвиг постепенно становится стабильным для достижения движения по заданной траектории по сравнению с управление переменной структурой, его амплитуда мала и плавает вверх и вниз по поверхности переключения, что значительно снижает вибрацию переменной структуры. А преимущества систем управления с переменной структурой полностью передаются «по наследству» [16]. Результаты моделирования показывают, что контроллер переменной структуры фильтра Калмана может не только обеспечить превосходную производительность управления переменной структурой управляемого объекта, но также может эффективно подавлять шумовые помехи.

Чтобы убедиться, что фильтр Калмана оказывает сильное фильтрующее воздействие на шумы различной интенсивности, параметры устанавливаются в пределах диапазона $\nu(k)$ [–0,5, 0,5] сигнала технологического шума и $w(k)$ [–0,5, 0,5] сигнала белого шума. Когда одноступенчатый сигнал, 1 амплитуда, синусоидальный сигнал 10 Гц, получаем следующие результаты моделирования (рис. 8).

Выброс $\sigma = 380\%$, время регулирования $T = 0{,}05$ сек. и погрешность устойчивости системы 0,08 % можно получить из приведенных выше рис. 8 и 9, которые иллюстрируют нарушение управления переменной структурой фильтра Калмана по отношению к различным шумам используя очень мощный фильтр. Стабильность и надежность такой системы гарантированы.

На рис. 10 и 11 показан выход контроллера с входным значением положительного сигнала 10, когда система подвержена случайным помехам, где параметры установлены для сигнала технологического шума в пределах $w(k)$ [–0,3, 0,3] и сигнала белого шума в пределах $\nu(k)$ [–0,3, 0,3].

Как показано на рис. 10, когда выбран положительный сигнал с амплитудой 10 и частотой 10 Гц, выходной сигнал контроллера фильтра Калмана может до определенной степени ограничивать внешние случайные помехи, но его выход имеет очевидные колебания, это снизит точность и надежность сервосистемы, которая не может удовлетворить требования устойчивости системы в зашумленной среде.

Как показано на рис. 11, когда контроллер с переменной структурой вводит алгоритм фильтра Калмана, выход системы управления отстает, эффективно уменьшая влияние внешних возмущений на систему через фильтр Калмана. Таким образом, желаемый эффект может быть достигнут точно, а надежность системы управления может быть значительно улучшена для обеспечения точного отслеживания положения сервосистемы руля направления.

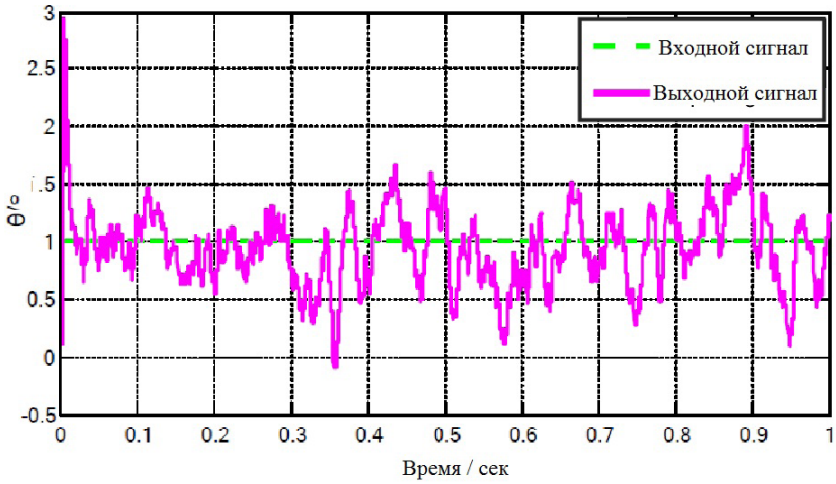


Рис. 8. Моделирование контроллера с переменной структурой при высоком шуме

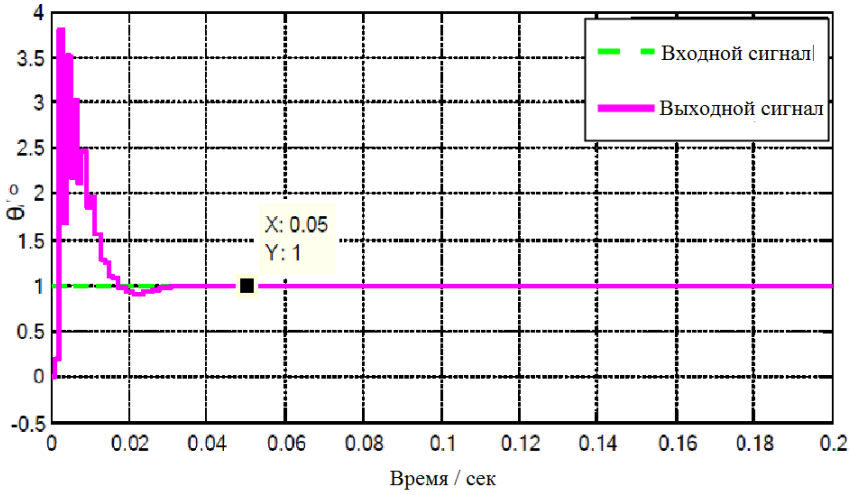


Рис. 9. Моделирование контроллера переменной структуры с фильтрацией Калмана при увеличении шума

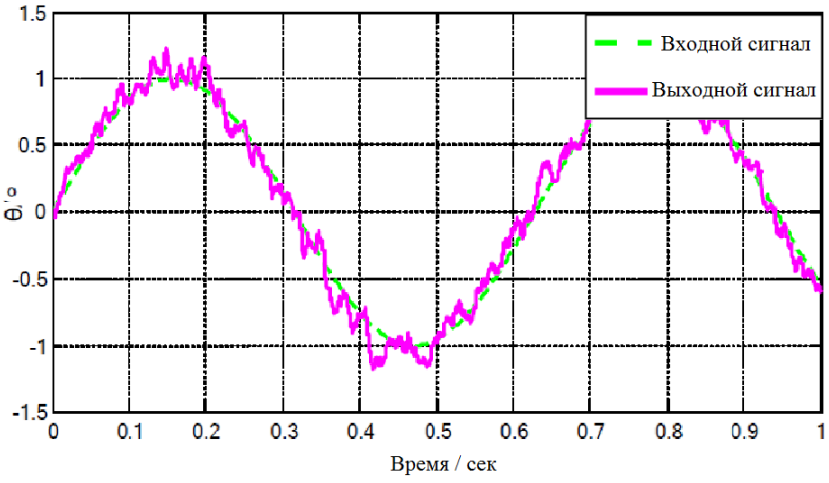


Рис. 10. Контроллер с переменной структурой без фильтра Калмана

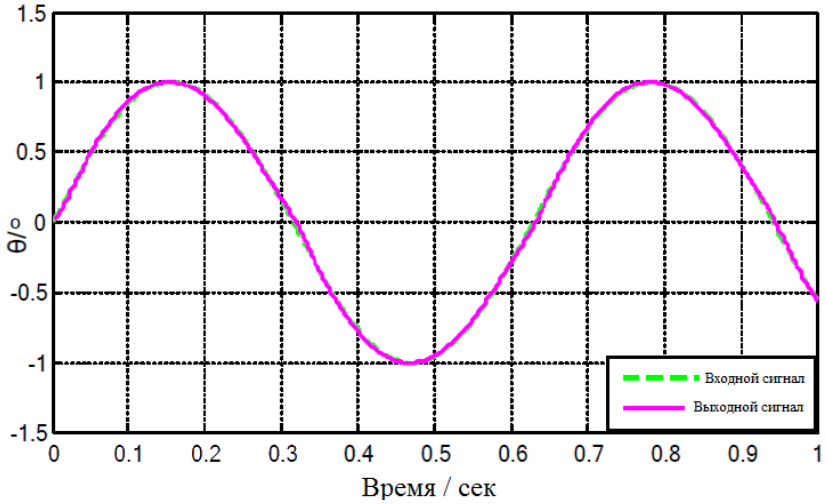


Рис. 11. Контроллер с переменной структурой на основе фильтра Калмана

Результаты моделирования показывают, что контроллер переменной структуры фильтра Калмана может обеспечить отличные характеристики управляемого объекта управления переменной структурой и эффективно подавлять шумовые помехи. Он может быстро отфильтровывать шумовые помехи различной интенсивности и различных инструкций и выводить требуемый сигнал. В нем улучшена противоинтерференционная способность и адаптивность системы. Он может заставить систему рулевого управления адаптироваться к неизвестной сложной траектории и улучшить точность наведения летательного аппарата.

Проектирование и моделирование адаптивного контроллера с переменной структурой фильтра Калмана

Можно сделать вывод, что контроллер фильтра Калмана может эффективно фильтровать входной сигнал с внешними случайными помехами. Но фильтр Калмана также имеет свои ограничения. При проектировании контроллера необходимо иметь точное уравнение состояния системы, которое формирует входной процесс, т. е. для применения фильтра Калмана для ослабления шума необходимо иметь известные статистические характеристики шумовых возмущений, в противном случае – характеристики фильтра. не может достичь желаемого эффекта [17], но бортовая система летательного аппарата не может точно предсказать внешний шум в системе рулевого механизма, поэтому система не может обеспечить оптимальную фильтрацию. Сам адаптивный фильтр предназначен для адаптации к различным средам, для интерактивного обучения, настройки, поэтому фильтр Калмана на основе конструкции адаптивного контроллера фильтра Калмана, а также его преимущества и недостатки сравниваются и анализируются [18–19].

Адаптивный фильтр Калмана

Матрица дисперсии R шума наблюдения системы и матрица дисперсии Q шума возбуждения не могут быть предсказаны в реальном времени. В сложной среде матрица наблюдения H и матрица состояния A системы могут измениться. Другими словами, шум, воспринимаемый системой рулевого управления, нельзя точно предсказать во время фактического полета летательного аппарата. Таким образом, модель, установленная системой, не может точно отражать состояние в реальном времени, так что контроллер не может хорошо играть свою роль или возникает отклонение фильтра, а система рулевого управления не может точно отрегулировать положение летательного аппарата.

В данном докладе при разработке контроллера переменной структуры фильтра Калмана использовался адаптивный алгоритм Сейджа-Хуса, который автоматически настраивает параметры фильтра Калмана, и адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана. Сэйдж и Хуса предложили адаптивный алгоритм фильтрации Калмана, основанный на адаптивной фильтрации. Это алгоритм согласования дисперсии, основанный на классическом фильтре Калмана. Он повторно пред-

сказывает и оценивает R или Q в реальном времени и передает их обратно в коэффициент усиления фильтра K для достижения онлайн-коррекции, прогнозирования и оценки системы в реальном времени. Он имеет простой принцип и высокую адаптируемость, и он может одновременно оценивать преимущества матриц шума наблюдения и технологического шума первого и второго порядка. И алгоритм постепенно использовал это в большинстве областей.

В сочетании с обобщенным принципом фильтра Калмана и дискретной формулой (1) для передаточной функции системы рулевого управления предполагается, что статистические характеристики шума w_k и ν_k следующие [17–18]:

$$\begin{cases} E(w_k) = q_k,\ E(v_k) = r_k \\ E(w_k v_j^T) = 0 \\ E(w_k w_j^T) = Q_k \delta_{kj},\ E(v_k v_j^T) = R_k \delta_{kj} \end{cases}, \quad (9)$$

где q_k – среднее значение технологического шума w_k; r_k – среднее значение наблюдаемого шума ν_k; q_k,r_k, Q_k,R_k – невозможно определить.

Адаптивный фильтр Калмана – это использование переменных наблюдения z_k для получения адаптивных фильтров Калмана и статистических оценок системного шума.

Далее приведена модель адаптивного фильтра Калмана.

Одношаговое предсказание состояния переменной состояния:

$$\hat{x}_{k,k-1} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} + \hat{q}_K. \quad (10)$$

Оценка состояния:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k,k-1} + K_k \hat{z}_k. \quad (11)$$

Новая информационная последовательность:

$$\tilde{z}_k = z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1} - \hat{r}_k. \quad (12)$$

Матрица усиления фильтра:

$$K_k = P_{k,k-1} H_k{}^T (H_k P_{k,k-1} H_k{}^T + R_k)^{-1}. \quad (13)$$

Максимум ковариации ошибки прогнозирования за один шаг:

$$P_{k,k-1} = A_{k,k-1} p_{k-1} A_{k,k-1}{}^T + B_{k,k-1} \hat{Q}_{k-1} B_{k,k-1}{}^T. \quad (14)$$

Ковариационная матрица ошибок оценки:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k,k-1}. \quad (15)$$

Используя модель оценки Sage-Husa Maximum, апостериорную статистику шума можно вычислить следующим образом:

$$\hat{r}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [z_j - H_j \hat{x}_{j,k}]; \quad (16)$$

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [z_j - H_j \hat{x}_{j,k} - r][z_j - H_j \hat{x}_{j,k} - r]^T; \quad (17)$$

$$\hat{q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2} \hat{x}_{j-1,k}]; \quad (18)$$

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2} \hat{x}_{j-1,k} - q] \times \times [\hat{x}_{j,k} - A_{j-1,j-2} \hat{x}_{j-1,k} - q]^T. \quad (19)$$

Уравнения (16) – (19) могут быть аппроксимированы прогнозной оценкой $\hat{x}_{j,j-1}$ ($\hat{x}_{j,j}$) переменной состояния системы X_k, чтобы заменить относительно сложную гладкую оценку $\hat{x}_{j,k}$ в уравнении, и тогда по новой информации $\hat{z}_k$ среднее значение от нуля к белому шуму, $E[\hat{z}_k] = 0$, $E[\hat{z}_k \hat{z}_k^T] = H_k P_{k,k-1} H_k^T + R$. Поэтому шум системного процесса, среднее значение наблюдаемого шума $\hat{q}_k$ и оценка $\hat{r}_k$ являются несмещенными:

$$\hat{r}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [z_j - H_j \hat{x}_{j,j-1}]; \quad (20)$$

$$\hat{q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [\hat{x}_{j,j} - A_{j-1,j-2} \hat{x}_{j-1,j-1}]. \quad (21)$$

Получаем следующие оценки:

$$E[\hat{R}_k] = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} E[\tilde{z}_k \tilde{z}_k^T] = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} H_k P_{k,k-1} H_k^T + R. \quad (22)$$

Уравнение (22) показывает, что оценка смещена, поэтому оценка субоптимальной несмещенной статистики максимального апостериорного шума:

$$\hat{R}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [\tilde{z}_k \tilde{z}_k^T - H_k P_{k,k-1} H_k^T]. \quad (23)$$

То же самое можно сказать про

$$\hat{Q}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k} [A_{j-1,j-2} P_{j,j-1} A_{j-1,j-2}^T - P] + Q. \quad (24)$$

Таким образом, может быть получена окончательная оценка адаптивного фильтра Калмана Sage-Husa:

$$\hat{r}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{r}_k + d_{k-1} (z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1}); \quad (25)$$

$$\hat{R}_k = (1-d_{k-1})\hat{R}_k + d_{k-1}(\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T - H_k P_{k,k-1}H_k^T); \quad (26)$$

$$\hat{q}_k = (1-d_{k-1})\hat{q}_k + d_{k-1}(\hat{x}_k - A_k\hat{x}_{k-1}); \quad (27)$$

$$\hat{Q}_k = (1-d_{k-1})\hat{Q}_k + \\ +d_{k-1}(K_k\tilde{z}_k\tilde{z}_k^T + P_k - A_{k,k-1}P_kA_{k,k-1}^T). \quad (28)$$

При этом $d_{k-1} = (1-b)/(1-b^k)$, $0 < b < 1$ является фактором забывания. Алгоритм управления адаптивным фильтром Калмана Сага-Хуса состоит из и (22) – (25).

Моделирование адаптивного регулятора с переменной структурой для фильтра Калмана

Параметры: $A = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.006 \\ 0 & 0.2926 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0656 \end{bmatrix}$, $H = [1,0]$, диапазон шума процесса в системе $w(k)$ и шума наблюдения системы $\nu(k)$ составляет [–0,3, 0,3], среднее значение равно 0. Параметры контроллера переменной структуры $\varepsilon = 200$, $c = 10$, $q = 300$.

переменной структурой на рис. 12 выше, запрограммирован s-функциональный модуль «AKSVC» управления с переменной структурой, имитация контроллера синусоидального сигнала частоты 10 Гц, рис. 13, рис. 18, рис. 19 для адаптивного фильтра Калмана. начальное моделирование различных параметров контроллера с переменной структурой; рис. 14, рис. 20, рис. 21 – исходные модели регулятора с различными параметрами регулятора b; настройки параметров:

$b_0 = 0{,}01$, $P_0 = 0{,}05$, $\hat{r}_o = 0$, $\hat{q}_o = 0$, $\hat{Q}_o = 10$, $\hat{R}_o = 10$.

На рис. 16 показано моделирование контроллера при синусоидальном сигнале амплитудой 10 и частотой 10 Гц.

Перерегулирование σ = 230% и время настройки t = 0,028 сек. контроллера адаптивного фильтра Калмана можно получить из рис. 15. Коэффициент ошибок контроллера можно увидеть на рис. 15, контроллер адаптивного фильтра Калмана может быстро настроить систему, обеспечить тенденцию функционирования системы с целью стабильно и эффективно отфильтровывания внешних шумовых помех. На рис. 13–16 контроллер может хорошо выводить желаемый сигнал при различном входном шуме. Можно сделать вывод, что производительность контроллера очень близка к производительности контроллера с переменной структурой фильтра Калмана, с быстрым временем регулирования, сильной фильтрацией, возможностью управления и надежностью.

Но результаты моделирования показывают, что адаптивный контроллер фильтра Калмана имеет определенное перерегулирование, и его стабильность лучше, чем у контроллера фильтра Калмана, он использует статистическую оценку шума, изменяющегося во времени, для изменения и оценки шума процесса и наблюдаемого шума в в реальном времени, а затем итеративно фильтруют наблюдаемый шум. Точность не так высока, как у контроллера фильтра Калмана, когда статистические характеристики шума постоянны.

Если диапазон шума процесса системы $w(k)$ и шума наблюдения системы $\nu(k)$ составляет [–0,3, 0,3] и среднее значение равно 0, тогда $\nu(k) = 10$, $R_0 = 10$, $c = 65$, $\varepsilon = 20$, $q = 600$.

Шумовая помеха $Q = 1$, $R = 20$ при заданном начальном значении регулятора фильтра Калмана представлена на рис. 17 моделирования регулятора с единичным ступенчатым сигналом.

Как показано на рис. 17 выше, производительность контроллера переменной структуры фильтра Калмана значительно снижается, ког-

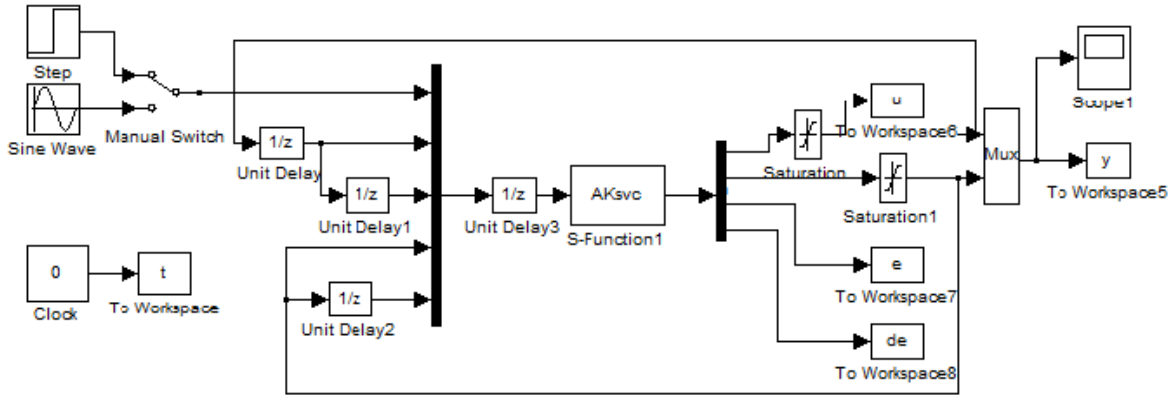


Рис. 12. Модель адаптивного контроллера Калмана с переменной структурой

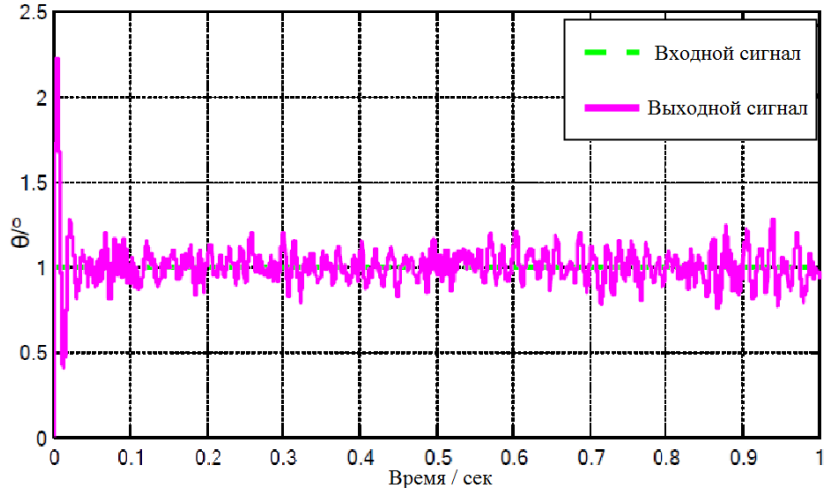


Рис. 13. Моделирование контроллера с переменной структурой с шумовыми помехами

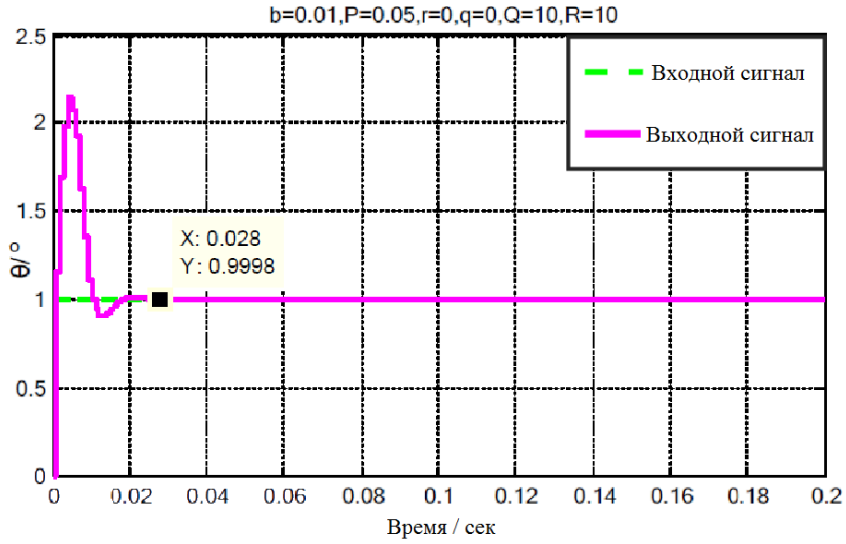


Рис. 14. Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

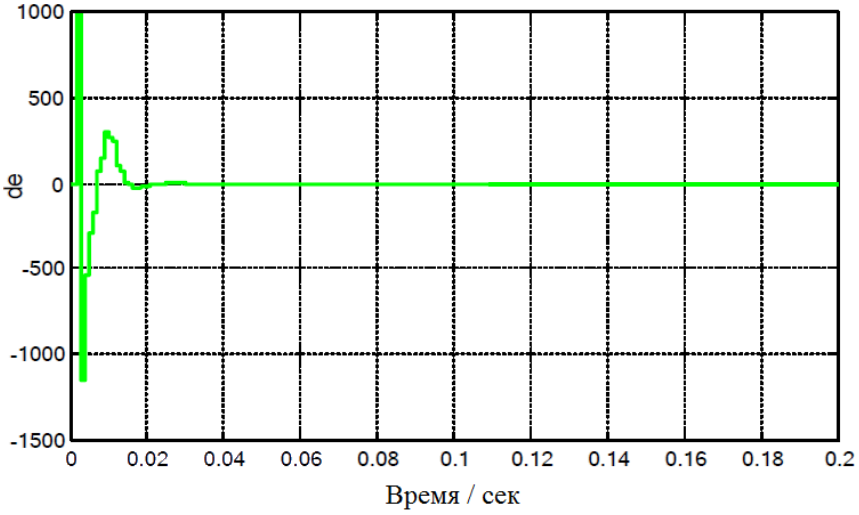


Рис. 15. Скорость изменения ошибки измерения

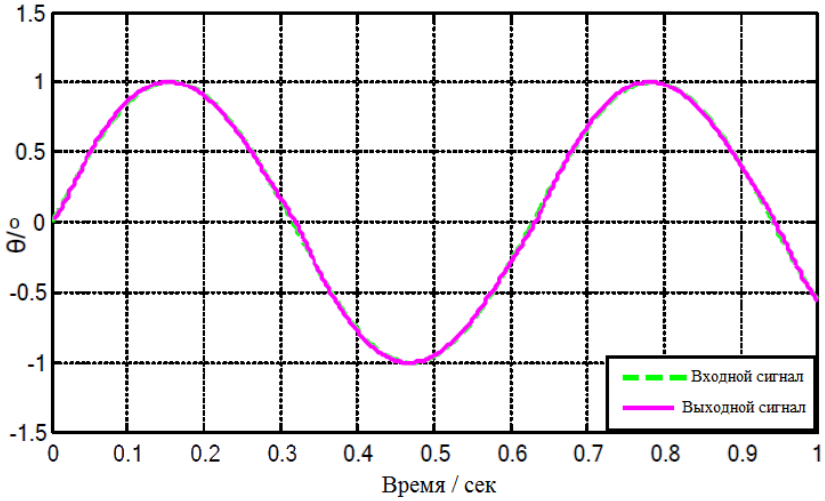


Рис. 16. В качестве синусоидального сигнала имитация контроллера

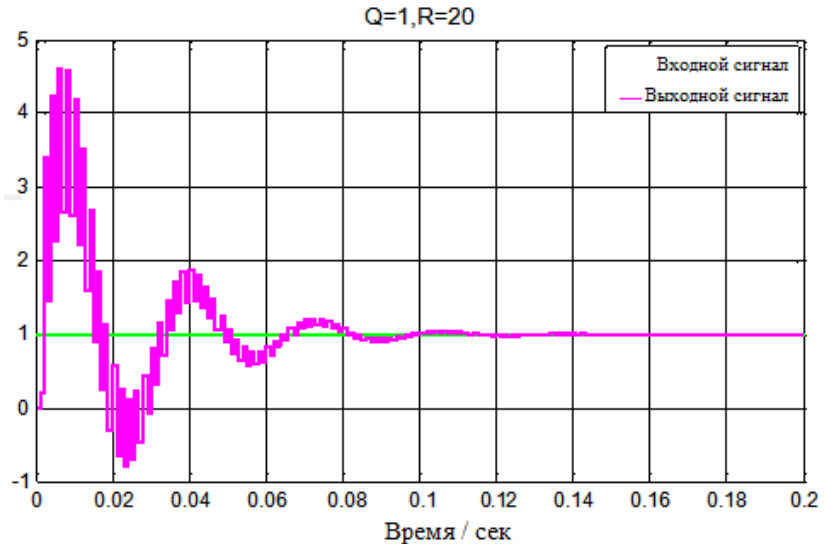


Рис. 17. Моделирование контроллера с переменной структурой Калмана

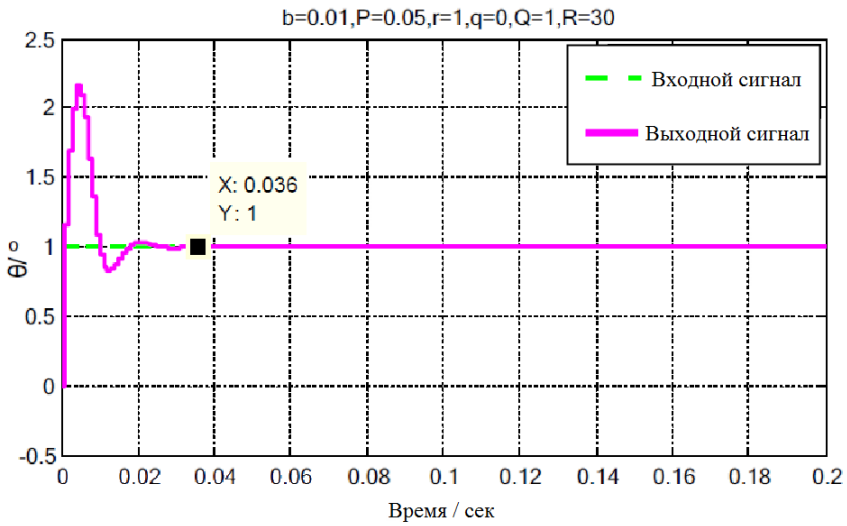


Рис. 18. Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

да начальные значения шумовых параметров Q и R не совпадают с реальными значениями, поэтому контроллеру фильтра Калмана требуется предварительное знание статистических характеристик помехи сигнала и шума, а его характеристики управления намного хуже, чем у адаптивного контроллера переменной структуры фильтра Калмана. Следовательно, в сложной среде шумовое возмущение иногда бывает неопределенным, и адаптивный контроллер фильтра Калмана может лучше удовлетворить потребности системы рулевого управления.

Эффективность регулятора переменной структуры адаптивного фильтра Калмана достигается, когда среднее значение шума системного процесса w_k равно q_k, среднее значение v_k шума r_k наблюдается, а начальное значение Q_k и R_k отличается.

$b_0 = 0{,}01$, $P_0 = 0{,}05$, $\hat{r}_o = 1$, $\hat{q}_o = 0$, $\hat{q}_o = 0$, $\hat{Q}_o = 1$, $\hat{R}_o = 30$.

Моделирование на рис. 14, 18 и 19 показывает, что адаптивный регулятор переменной структуры фильтра Калмана чувствителен к начальным значениям. Смоделированная шумовая помеха представляет собой сигнал белого шума со средним значением 0 и диапазоном [–0,3, 0,3]. В (1) параметр $\hat{r}_o = 0$, $\hat{q}_o = 0$, $\hat{Q}_o = 10$, $\hat{R}_o = 10$ согласуется с реальным значением, эффект управления наилучший, перерегулирование мало, время настройки заведомо меньше, (2), (3) различное моделирование параметров показывает, что начальное значение настройки

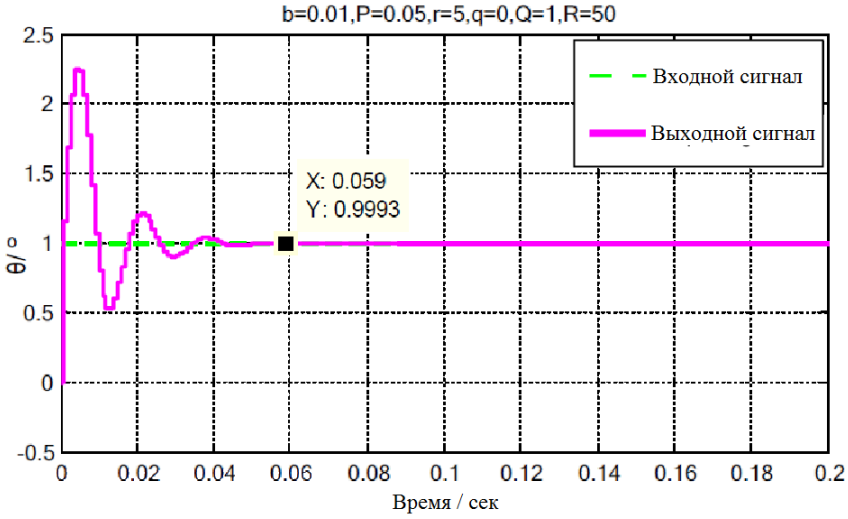


Рис. 19. Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

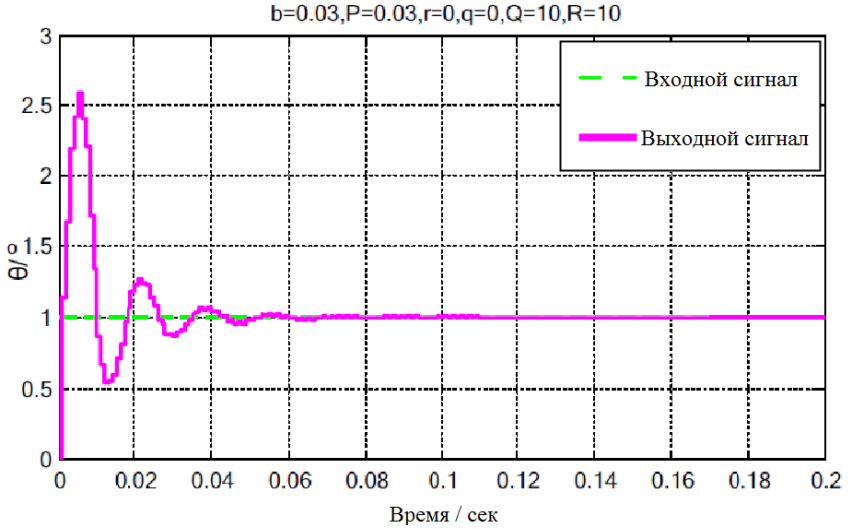


Рис. 20. $b_0 = 0{,}03$, Адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

регулятора ближе к шумовой характеристике, чем лучше качество управления, тем быстрее система достигает устойчивости; когда ошибка начального значения велика.

$b_0 = 0{,}01, P_0 = 0{,}05, \hat{r}_o = 5, \hat{q}_o = 0, \hat{q}_o = 0, \hat{Q}_o = 1, \hat{R}_o = 50.$

Контроллер будет подстраиваться медленно, время подстройки увеличивается, его производительность не так хороша, как у контроллера с переменной структурой фильтра Калмана. Хотя регулятор переменной структуры адаптивного фильтра Калмана не зависит от статистических характеристик шумовых помех и корректирует, и оценивает значение среднего значения шума r, q, Q, R в режиме онлайн заданное начальное значение не должно иметь слишком большой погрешности, иначе производительность системы управления будет значительно снижена.

$b_0 = 0{,}03,\ P_0 = 0{,}03,\ \hat{r}_o = 1,\ \hat{q}_o = 0,\ \hat{q}_o = 0, \hat{Q}_o = 1,\ \hat{R}_o = 30.$

$b_0 = 0{,}04,\ P_0 = 0{,}03,\ \hat{r}_o = 1,\ \hat{q}_o = 0,\ \hat{q}_o = 0, \hat{Q}_o = 1,\ \hat{R}_o = 30.$

Как видно из рис. 20 и рис. 21, контроллер переменной структуры адаптивного фильтра Калмана требует высокого начального значения b_k. При $b_0 = 0{,}04$ алгоритм адаптивного фильтра Калмана будет расходиться. Следовательно, при разработке контроллера переменной структуры адаптивного фильтра Калмана начальное значение коэффициента b_k забывания адаптивного фильтра Калмана должно быть очень точным [22–24].

Из результатов моделирования видно, что адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана очень чувствителен к своим параметрам настройки, и когда начальное значение близко к реальному значению, можно гарантировать высокую точность. В целом, хотя адаптивная фильтрация Калмана с переменной структурой контроллера для требуемых параметров, но она имеет очевидные преимущества, в процессе движения системы могут быть неопределенные факторы, приводящие к возмущению, математическая модель и шумовые статистические характеристики изменения, а именно A, H или R, Q изменений, в процессе движения контроллер может оценить изменения в режиме онлайн и объединить с информацией наблюдения, фильтруя, чтобы эффективно улучшить адаптивность, стабильность и надежность системы.

Выводы

Исследованы основные концепции ПИД-регулирования, нечеткого управления, управления переменной структурой, фильтра Калмана и адаптивного фильтра, а затем соответствующие контроллеры проектируются и устанавливаются с помощью этих алгоритмов, а моделирование различных контроллеров выполняется с помощью разных инструкций. Проверена работоспособность различных контроллеров. Контроллер с переменной структурой фильтра Калмана имеет отличные характеристики

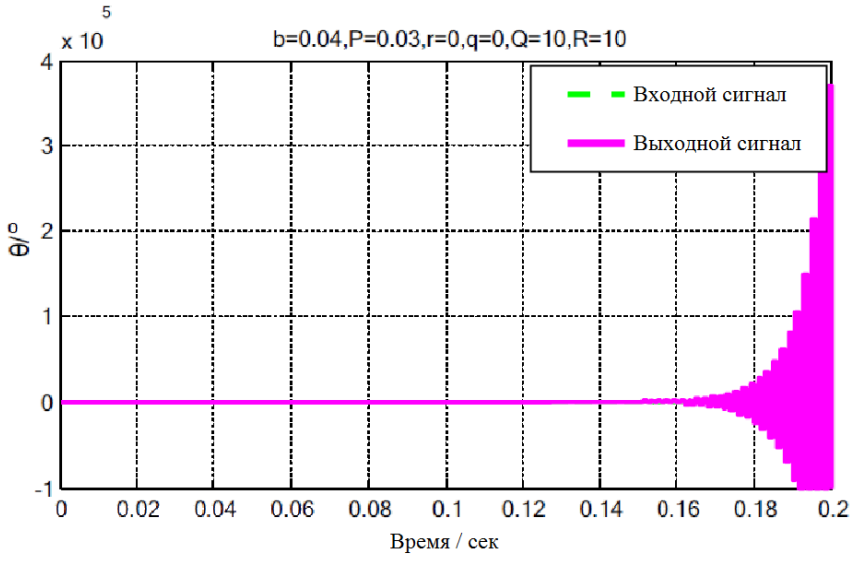


Рис. 21. $b_0 = 0{,}04$, адаптивное моделирование переменной структуры Калмана

управления и подавления шумовых помех. Адаптивный контроллер переменной структуры фильтра Калмана может эффективно подавлять помехи переменного шума, и его отличные характеристики и ограничения проверены. Доказано, что разработанный контроллер позволяет значительно улучшить адаптивность и надежность системы рулевого привода.

Библиографический список

1. *Lin Zhongwan*. Research on Servo Control System of Missile Steering Gear Based on DSP [D]: Master's Thesis. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.

2. *Liangjie Sun*, *Jianquan Lu*, *Yang Liu et al*. Variable structure controller design For Boolean networks [J]. Neural networks, 2018. 97 p.

3. *Wang Shengming. Nanjing*: Nanjing University of Science and Technology. Chinese, 2010.

4. *Yang Hairong*. Design of Electric Steering Gear Based on Variable Structure Control [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

5. *BI Ye*. Design and Development of Digital Servo Control System for Steering Gear of Flight Missile [D]. Xi 'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.

6. *Zuo Zhidan*. Research on Variable Structure Control Algorithm and Its Application in Missile Control System [D]. Harbin Engineering University, 2013.

7. *Синь В., Гонг Д. Перлюк В. В.* Исследование закона наведения с ограничением угла встречи на основе оптимального управления // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докладов Третьей международной научной конференции. СПб. 2022. С. 20-25.

8. *Сяоян Х., Перлюк В. В.* Исследование однопараметрического нечеткого контроллера прямой связи // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докладов третьей Международной научной конференции. СПб. 2022. С. 33–38.

9. *Ху Сяо Ян*, *Перлюк В. В.* Применение бортового одопараметрического контроллера нечеткой логики для увеличения точности управления малым беспилотным телательным аппаратом // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сб. ст. IV Международного форума. СПб. 2023. С. 136.

10. *Jia Ping*, *Su Jing*. Modeling and Simulation of Electric Steering Gear System [J] // Electronic Technology and Software Engineering. 2015. (15):80–82.

11. *Zhang Hongqi*. Research on application of novel Adaptive Kalman Filter Algorithm in Integrated Navigation [D]. [Master's Thesis]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.

12. *Changfan Zhang*, *Na Liu*, *Han Wu*, *Jing He*. Design of Sliding Mode Variable Structure Servo Driver Based on Hardware [J] // Journal of Electrical Systems. 2017. 13 (1).

13. *Ju Huo*, *Jia Shan Cui*. Design of Spacecraft Controller Based on Adaptive Fuzzy Sliding Mode Variable Structure [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013261, 7.

14. *Xu Xiao Hu*, *Han Tao Chen*, *Gang Chen*, *Xin Rong Xu*. Research on the Step by Step Sliding Mode Variable Structure Adaptive Control [J]. Advanced Materials Research, 2013931.

15. *Tian GUI*, *Xie Jian*, *Chen Yuxiang*, *Zhu Hongchen*. Design and application of an improved global sliding mode variable structure controller [J]. Control engineering of China, 2018, 25(04):587–590.

16. *Tian GUI*, *Xie Jian*, *Chen Yuxiang*, *Zhu Hongchen*. Design and application of an improved global sliding mode variable structure controller [J]. Control engineering of China, 2018,2 5(04):587–590.

17. *Xu Lubing*. Research on Anti-jamming Tracking Control Algorithm for Hypersonic Vehicle [D]. Yangzhou University, 2018.

18. *Shi Rudong*. Research and Implementation of Adaptive Fuzzy Control Algorithm [D]. Harbin Institute of Technology, 2008.

19. *Yang Jun*. Transient Performance Enhancement of Adaptive Control System and its application in Aircraft Attitude Control [D]. Kunming University of Science and Technology, 2020.

20. *Liu Wei, Ma Biao, Ma Qiang et al*. Application of Kalman Filter and Genetic PID Control algorithm in improving sowing accuracy [J/OL]. Journal of anhui agricultural university: 1–6 [2021-08-25].

21. Wang Li, Jia Jianfang. Identification of Steering Gear Transfer Function Based on Adaptive Genetic Algorithm [J]. Electronic Testing,2 012(03):12–15.

22. *Wei Liu*, *Biao Ma*, *Qiang Ma et al*. Application of Kalman Filter and Genetic PID Control algorithm in improving sowing accuracy [J/OL] // Journal of anhui agricultural university: 1–6 [2021-08-26].

23. *Chen Yawen*. Research on Optimal State Estimation Strategy method of Multi-controller Based on Kalman Filter [D]. Beijing University of Technology, 2018.

24. *Gao Bo*, *Zhang Zhong*, *Li Haibo et al*. Research on Blind Source Noise Reduction Method of Aircraft Based on Robust Control [C]. Beijing Institute of Mechanics. Proceedings of the 25th Annual conference of Beijing Dynamic Society. Beijing Institute of Mechanics: Beijing Institute of Mechanics, 2019:794–795.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИСТИКА

УДК 656:681.518.5:004.738.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-97-101**

А. В. Аграновский*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ЛОГИСТИКЕ

Рассмотрены основные области применения технологий Интернета вещей для решения транспортно-логистических задач. Представлены сведения о состоянии российского рынка Интернета вещей, стоящих перед ним задачах и особенностях импортозамещения. Приведены данные о предлагаемых российскими производителями технических решениях.
Ключевые слова: *Интернет вещей, IoT, логистика, транспорт, импортозамещение.*

A. V. Agranovskii*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF IMPORT SUBSTITUTION OF INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES IN LOGISTICS

The main areas of application of the Internet of things technologies for solving transport and logistics problems are considered. Information is presented on the state of the Russian market of the Internet of things, the tasks facing it and the features of import substitution. Data on technical solutions offered by Russian manufacturers are given.
Keywords: *Internet of things, IoT, logistics, transport, import substitution.*

Концепция Интернета вещей (Internet of Things, IoT) был впервые сформулирована еще в 1999 г. исследователем Массачусетского технологического института Кевином Эштоном, однако началом эпохи Интернета вещей принято считать момент между 2008 и 2009 гг., когда по данным компании Cisco количество подключенных к интернету неодушевленных предметов превзошло численность населения Земли (рис. 1) [1]. Это количество продолжает неуклонно возрастать, и по прогнозам IDC к 2025 г. в мире будет насчитываться 55,7 млрд подключенных устройств.

В октябре 2021 г. заместитель председателя Правительства России Дмитрий Чернышенко на заседании наблюдательного совета АНО «Цифровая экономика» предложил определить целевым показателем для нашей страны миллиард устройств Интернета вещей к 2025 г. [2]. «Это позволит нам через четыре года превысить среднемировые показатели проникновения устройств Интернета вещей и насытить платформы данными, необходимыми для успешной цифровой трансформации важных отраслей, таких как транспорт, сельское хозяйство и здравоохранение» – сказал при этом Дмитрий Чернышенко.

В соответствии с дорожной картой по Интернету вещей, утвержденной в 2020 г. Правительственной комиссией по цифровому развитию, объем продаж российских производителей на внутреннем рынке к 2024 г. должен составить 207,3 млрд рублей, на внешнем – 2,5 млрд рублей, а число специалистов на этом рынке должно к 2024 г. составить 4,2 млн [3].

Что касается отраслей, то по внедрению IoT-устройств лидируют управляющие и энергосбытовые компании (30% рынка), следом идут игроки рынка недвижимости (23%), а транспортные и логистические компании и промышленные предприятия делят рынок примерно поровну: 13% и 12% соответственно [4].

Базовыми для Интернета вещей принято считать:

– технологии построения сетей связи;

– протоколы и стандарты передачи данных;

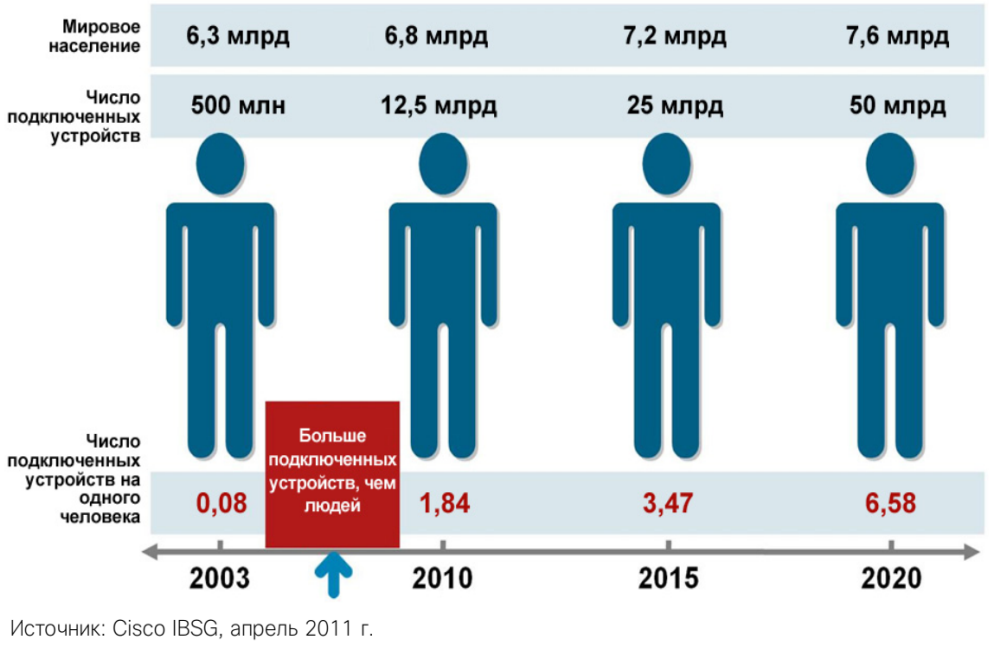


Рис. 1. Соотношение подключенных устройст и мирового населения

– оборудование для обеспечения взаимодействия (базовые станции, маршрутизаторы и т. п.);

– оконечные устройства (датчики, сенсоры, контроллеры);

– IoT-платформы;

– обеспечение безопасности интернета вещей (глобальная проблема, связанная с практически полным отсутствием шифрования трафика).

Таким образом, основными игроками рынка Интернета вещей являются разработчики и производители оконечных устройств, поставщики услуг связи, провайдеры облачных сервисных платформ, разработчики приложений и сервисов, а также интеграторы, способные объединить в единую систему программные и аппаратные изделия разных производителей.

В атлас российского рынка Интернета вещей 2021 г. от CNews Analitics включены следующие компании (рис. 2) [5]. Очевидно, что большинство игроков данного рынка в 2021 г. были сосредоточены в области разработки программного обеспечения для Интернета вещей.

Основные области применения технологий Интернета вещей для совершенствования логистики в широком смысле, включающей складские операции, организацию перевозок (том числе и управление транспортом) и доставки грузов, представлены в табл. 1 [6].

Внедрение технологий Интернета вещей дает возможность повысить эффективность всех логистических процессов, безопасность и качество обслуживания, обеспечить получение выгоды от внедрения новых технологий как самим логистам, так и их партнерам и конечным потребителям.

Ввод в действие международных санкций привел к существенным изменениям на рынке, включая рынок Интернета вещей. Российские компании были вынуждены отказаться от решений многих зарубежных производителей. На первый план вышли вопросы импортозамещения программных и аппаратных средств.

Вопросы импортозамещения программного обеспечения (ПО) для государственных компаний и предприятий рассматривались в России с начала 2000-х гг., но особое внимание этим вопросам стало уделяться с 2014 г. после введения первых санкций против госсектора российской экономики. Так, в 2016 г. заработал Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных, и с 1 января 2016 г. было введено ограничение для государственных заказчиков на закупку ПО, отсутствующего в реестре. В то же время не было установлено ограничений для частных компаний.

Уход в 2022 г. с российского рынка зарубежных игроков открыл широкие возможности для российских разработчиков ПО, так как многие пользователи зарубежных продуктов оказались под угрозой полного прекращения деятельности, и миграция на российские программные продукты стала для них жизненно необходимой.

19 октября 2022 г. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций

Рис. 2. Компании из атласа российского Интернет-рынка

Таблица 1

Области применения технологий

Подключенный транспорт	Полная прозрачность перемещения
	Контроль режима движения
	Повышение эффективности использования транспорта
	Укрепление дисциплины водителей
Управление автопарком	Адаптация обслуживания к условиям эксплуатации
	Автоматическая диспетчеризация
	Интеграция с ERP-системами
Автономный транспорт	Ассистенты помощи водителям
	Автопилот движения по трассе
	Перспективные системы полной автономности
Обеспечение безопасности	Идентификация «свой-чужой»
	Предотвращение краж топлива и нецелевого использования транспорта
	Доступность данных для расследования инцидентов
Технологии на основе Интернета вещей для логистики	Спутниковая геолокация
	Мобильный интернет
	«Облачные» вычисления
	RFID
Отслеживание активов	Контроль местоположения и передвижения товаров
	Мгновенная инвентаризация склада и торгового зала
	Видимость товаров на всем протяжении цепочки поставки
«Умная» инфраструктура	Централизованное управление
	Мониторинг состояния элементов трубопроводов
	Контроль нагрузки и износа мостов и тоннелей
Автоматизация складов	Роботы, перемещающие стеллажи с товарами
	Полностью автоматические складские системы
	Перспективные автономные автопогрузчики
Мониторинг активов	Отслеживание ключевых параметров
	Мгновенное реагирование на изменение состояния
	Доступность данных на всем протяжении цепочки поставки

РФ объявило о запуске портала Russoft.ru, на котором собраны отечественные программные продукты, представленные на рынке и включенные в реестр российского ПО. Среди этих продуктов имеются и платформы промышленного интернета вещей.

Существенные проблемы в 2022 г. возникли и с электронными устройствами Интернета вещей, ассортимент которых в значительной степени формировался за счет зарубежных производителей. Так, объявила о банкротстве созданная в 2020 г. компания «SigFox Россия», предлагавшая в том числе и решения по мониторингу движения грузов, включая международные контейнерные перевозки, отслеживание фур и возвратной тары, контроль над перевозкой скоропортящихся грузов, работу с отходами. В заявлении о банкротстве указывается, что сингапурская компания UnaBiz SAS (поглотившая ранее французскую фирму SigFox SA) из-за международных санкций не может поставлять необходимое оборудование для осуществления деятельности «SigFox Россия» [7].

Согласно решению Госкомиссии по радиочастотам (ГКРЧ), с 1 декабря 2021 г. допускается использование базовых станций IoT, произведенных на территории РФ, которым присвоен статус телекоммуникационного оборудования российского происхождения

18 июля 2022 г. было объявлено о разработке в России системы оценки для признания телекоммуникационного оборудования отечественным. Основными критериями являются наличие у производителя прав на конструкторскую и технологическую документацию, на товарный знак и исходный код ПО, а также производства и сервисных центров на территории России. При этом только оборудование, удовлетворяющее указанным критериям, сможет участвовать в госзакупках [8].

Среди действующих на сегодняшний день российских компаний, предлагающих технические решения в области логистики можно отметить 1С, реализующую модули «1С:TMS Логистика. Управление перевозками», «1С:Управление автотранспортом» и «1С:Транспортная логистика, экспедирование и управление автотранспортом» [9]. Источником информации для них являются установленные на транспортных средствах датчики ГЛОНАСС, а также дополнительные датчики уровня топлива, температуры, наклона и пр. Аналогичные решения как на базе продукции 1С, так и использованием собственных разработок предлагает компания Айтоб (ITOB) [10].

Группа компаний «Цифра» предлагает IoT-решения в области оптимизации логистики в горнодобывающей промышленности [11]

Один из лидеров рынка мобильной связи компания Мегафон, обладающая широкими возможностями в области телекоммуникаций и обработки данных, предлагает корпоративным клиентам услуги по контролю автопарка (маршрутов и движения транспортных средств, расхода топлива и показаний приборов), контролю грузов (местоположение груза, маршрут движения, отклонение от маршрута, своевременность погрузки, уведомление о нештатных ситуациях с грузом и т. п.) [12]. Развитая аналитика позволяет оптимизировать логистические процессы.

Линейку мониторинговых блоков «Вега МТ», предназначенных для контроля транспортных средств с использованием системы позиционирования ГЛОНАСС/GPS, выпускает новосибирское ООО «Вега-Абсолют». Данное оборудование и программное обеспечение реализованы в соответствии со спецификацией LoRa Alliance, что делает их совместимыми со всеми LoRaWAN сетями и оборудованием других производителей [13].

Таким образом, ранее принятые в России меры позволили сохранить возможность развития в стране системы Интернета вещей.

Особенностью российского рынка высокотехнологичной продукции является то, что основным источником его развития являются государственные средства, которые вкладываются либо через государственные (в том числе региональные) программы, либо через крупные госкомпании. Поэтому достижение ранее поставленных целей развития в области Интернета вещей в значительной степени зависит от позиции государства.

Библиографический список

1. *Дейв Эванс*. Интернет вещей. Cisco IBSG, 2011. 14 с.

2. Новостной портал Правительства РФ. URL: http://government.ru/news/43542/ (дата обращения: 05.12.2022).

3. Блог компании Телеспутник. URL: https://telesputnik.ru/materials/gov/news/na-razvitie-interneta-veshchey-napravyat-22-4-mlrd-rubley-na-blokcheyn-10-1-mlrd-rubley (дата обращения: 05.12.2022).

4. *Матвеев Михаил*. NB-IoT – восходящий тренд. URL: https://www.comnews.ru/content/223301/2022-12-01/2022-w48/nb-iot-voskhodyaschiy-trend (дата обращения: 05.12.2022).

5. Интернет вещей в России 2021. URL: https://www.cnews.ru/reviews/internet_veshchej_v_rossii (дата обращения: 05.12.2022).

6. *Чурилов Данил*. Интернет-вещей и управление цепочками поставок в России. URL: https://ediweb.com/ru-

ru/media/blog/internet-veshhej-i-upravlenie-cepochkami-postavok-v-rossii (дата обращения: 05.12.2022).

7. Новости цифровой трансформации, телекоммуникаций и ИТ. URL: https://www.comnews.ru/content/220907/2022-06-27/2022-w26/sigfox-nepokoril-rossiyu (дата обращения: 05.12.2022).

8. Регулирование госзакупок электронной продукции. URL: https://www.tadviser.ru/a/282064 (дата обращения: 05.12.2022).

9. Решения 1С. URL: https://solutions.1c.ru/sfm-wms (дата обращения: 05.12.2022).

10. Программы ITOB для управления транспортной логистикой. URL: https://itob.ru/products (дата обращения: 05.12.2022).

11. Цифра – технологии цифровизации для повышения эффективности. URL: https://www.zyfra.com/ru (дата обращения: 05.12.2022).

12. IoT-решения от Мегафон. URL: https://iot.megafon.ru (дата обращения: 05.12.2022.)

13. Компания «Вега-Абсолют». URL: https://vega-absolute.ru/production/monitoring-transporta/ (дата обращения: 05.12.2022).

УДК 004.852

С. А. Андронов*
кандидат технических наук, доцент
М. С. Прокофьева*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В СИСТЕМАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обучение с подкреплением интересно тем, что в отличие от традиционного машинного обучения (с учителем и без него), позволяет изучить долгосрочные стратегии и применять их к сложным промышленным и бизнес-задачам. Данный подход в направлениях создания искусственных систем работает лучше всего, когда решения принимаются последовательно, а действия связаны с исследованием окружающей среды.
В статье рассмотрены особенности ряда программных систем имитации, применяющих методы обучения с подкреплением. Основное внимание уделено идейной стороне применяемых в имитационных программах безмодельных алгоритмов, которые теоретически применимы к любой задаче. Они изучают стратегии через взаимодействие, усваивая при этом любые правила окружающей среды. В результате сравнения алгоритмов выявлены их достоинства и недостатки.
Ключевые слова: *Anylogic, искусственный интеллект, искусственные нейронные сети, обучение с подкреплением, машинное обучение.*

S. A. Andronov*
PhD, Tech., Associate Professor
M. S. Prokofieva*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REINFORCEMENT LEARNING METHODS AND ALGORITHMS IN SIMULATION SYSTEMS

Reinforcement learning is interesting because, unlike traditional machine learning (supervised and unsupervised), it allows you to learn long-term strategies and apply them to complex industrial and business problems. This approach in the direction of creating artificial systems works best when decisions are made consistently, and actions are associated with the study of the environment.
The article considers the features of a number of simulation software systems that use reinforcement learning methods. The main attention is paid to the ideological side of the modelless algorithms used in simulation programs, which are theoretically applicable to any task. They learn strategies through interaction, while assimilating any rules of the environment. As a result of comparing the algorithms, their advantages and disadvantages are revealed.
Keywords: *Anulogic, artificial intelligence, artificial neural networks, reinforcement learning, machine learning.*

Введение

При моделировании сложных систем, для которых недоступно использование аналитического описания, могут быть применены различные среды для реализации имитационного моделирования: Anylogic, Matlab Simulink, MvStudium, Arena, GPSS-WORLD, ExtendSim, Simio, Simul8, Flexim, AutoMod, ProModel, Witness, Enterprice Dynamics и др.

Наибольшей популярностью и среди пользователей, и по числу реализованных проектов в мире принадлежит многоподходной среде моделирования – AnyLogic [1], которая успешно применяется при решении различных задач, таких как: управление производством, логистика, цепочка поставок, бизнес-процессы, управление активами и т. д.

Основное внимание направлено на связь систем имитации с элементами искусственного интеллекта (ИИ). Решения, основанные на комбинации имитационного моделирования с элементами ИИ, как показала практика, превосходят хорошо зарекомендовавшие себя методы и алгоритмы, например [2]. Группы методов, представляющих из себя собирательный образ ИИ, представлен на рис. 1.

Наиболее распространенный метод реализации ИИ в совокупности с имитационным моделированием является метод на основе машинного обучения – обучение с подкреплением. Это объясняется, в частности тем, что политики (или стратегии поведения агента) в алгоритмах обучения с подкреплением или RL (Reinforcement Learning) [3], использующиеся при имитации, могут динамически корректировать целевой показатель на временном такте, тогда как традиционные подходы являются, как правило, статическими. RL – это заменитель адаптивного регулирования в из теории автоматического управления.

Термин Глубокое машинное бучение (DRL (Deep Reinforcement Learning) относится к искусственным нейронным сетям (ИНС), которые в свою очередь представляет собой последовательность слоев, каждый из которых, в свою очередь, состоит из нейронов, и каждый выполняет свою роль. Такие структуры способны учиться без руководства человека на необработанных данных [1].

Существует возможность, совместного использования обучения с подкреплением, искусственных нейронных сетей и глубокого машинного обучения, позволяющая хорошо обобщать сценарии, с которыми, приведенные выше подходы, никогда раньше не сталкивались.

Необходимо отметить, что процесс обучения с подкреплением (как совместный, так и без применения других методов ИИ) является весьма затратным в вычислительной плане и все усилия разработчиков алгоритмов, и используемые в них эвристики направлены на преодоление этой методической трудности. Другой проблемой является то, что по причине зависимости от исследования окружающей среды из-за частых ее изменений агенту сложно предпринимать наилучшие действия.

Применение ИИ в системах имитационного моделирования

Использование машинного обучения в имитации, как и в других направлениях применения ИИ, является лишь средством облегчения решения проектных задач. Начиная с версии 8.7.4 в AnyLogic появилась возможность повысить эффективность в решении выше названных задач за счет интеграции с платформами машинного обучения [1]. Основные методы на основе обучения с подкреплением, представлены на рис. 2.

Пользователи любой версии, включая Personal Learning или University, могут экспортировать модели для явного использования на обучающих платформах, таких как Project Bonsai (ранее была доступна платформа Pathmind, но сейчас она не поддерживается в AnyLogic.). В версии Professional есть возможность напрямую подключения фреймворка машинного обучения с подкреплением RL4J, который поддерживает алгоритмы DQN (Deep Q Learning Network) и Async RL (A3C, асинхронное обучение NStepQ). Фреймворк RL4J интегрирован с би-

Рис. 1. Области и подобласти ИИ

Рис. 2. Методы реализации обучения с подкреплением в AnyLogic

блиотекой deeplearning4j, написанной на Java. Также стало возможным в кодовых полях системы писать на Python – законодателе в области машинного обучения, имея при этом полный доступ к API AnyLogic и всем библиотекам.

На данный момент в Project Bonsai реализован алгоритм DQN, т. е. Q-обучение в сочетании с глубокими нейронными сетями, а также алгоритм PPO (Proximal Policy Optimization), который доказал свою эффективность в различных сценариях использования. После обучения для развертывания обученной политики Project Bonsai применяют либо сервер политик Project Bonsai, использующий REST API, или загрузив файл политики (разрешающий программные запросы).

В числе проектов от Microsoft также следует назвать Project AirSim [12] – симулятор с открытым исходным кодом для глубокого машинного обучения автономных транспортных средств от Microsoft, построенный на Unreal Engine / Unity. Плагин Unity – кроссплатформенный продукт с открытым исходным кодом, который поддерживает программную симуляцию с популярными контроллерами полета, такими как PX4 и ArduPilot, и аппаратную симуляцию с PX4 для физически и визуально реалистичного моделирования.

Вопросами реализации связки средств имитации с ИИ нельзя обойти вниманием Python и связанные с ним библиотеки, как наиболее продвинутого средства создания проектов машинного обучения. Интерес в данном контексте представляет библиотека SimPy – система моделирования дискретных событий. В SimPy процессы описываются простыми Python генераторами и могут использоваться в создании и запуске среды, для имитации активных компонентов, таких как клиенты, транспортные средства или агенты. Программный интерфейс приложения Python API с алгоритмами RL (PPO, SAC (Soft Actor-Critic)), используется для запуска обучения, тестирования и т. д., а также поддерживает связь с алгоритмами RL, в частности с библиотекой RLPy [13].

Также в числе лидеров рассматриваемого направления следует назвать Matlab с имитационным модулем Simulink (рис. 3). Интерфейс для выполнения тренировки политик ИИ с помощью алгоритмов RL обеспечивает приложение Reinforcement Learning Toolbox (рис. 4) с по-

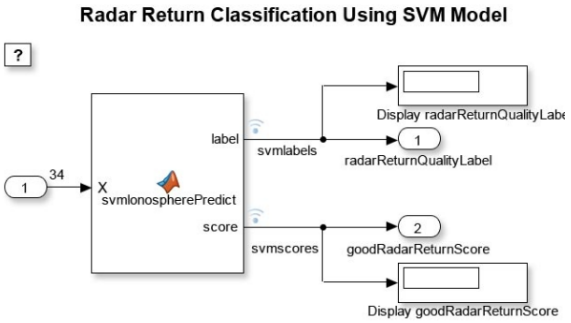


Рис. 3. Использование модели машинного обучения в Simulink [4]

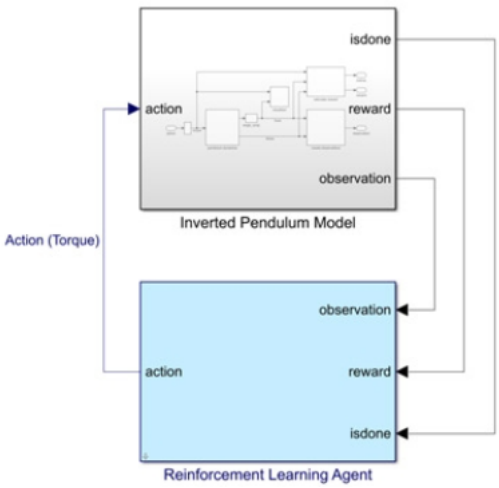


Рис. 4. Блок Simulink Reinforcement Learning Agent

мощью алгоритмов обучения с подкреплением, включая DQN, PPO, SAC и DDPG (Deep Deterministic Policy Gradients), о которых речь ниже.

Для реализации взаимодействия средств имитации с машинным обучением общим является прохождение следующих этапов:

1. Разработка имитационной модели – создание достоверного цифрового двойника реальной системы.

Для этого важен сбор статистических данных из надежного источника для каждого сценария моделирования. В итоге необходимо сравнить результаты, получаемые с модели и реального объекта.

2. Генерация синтетические данные для машинного обучения (чистых, детальных данных, покрывающих все возможные сценарии).

3. Тренировка ИИ в модели.

4. Тестирование работу уже обученного ИИ в модели (перед внедрением в реальные процессы) и собственно развертывание.

Для лучшего понимания механизмов алгоритмов RL, реализованных в системах имитационного моделирования, следует рассмотреть их подробнее.

Методы и алгоритмы RL

Отличием от известных подходов обучения с учителем (агенту предоставляются заранее «помеченные» данные: пары вход/правильный ответ, на которых он учится) и без учителя (агенту предоставляются необработанные («непомеченные») данные, в которых он должен обнаружить скрытые взаимосвязи). В подходе RL нет ответов учителя, но есть ответная реакция среды. Такая среда может быть реальной (например, на частных дорогах, в ограниченном воздушном пространстве, либо на учебной конвейерной линии) или виртуальной. Под моделью среды здесь подразумевают функцию, которая предсказывает переходы состояний и вознаграждения.

Таким образом, подход чем-то напоминает обучение с учителем, – только в роли учителя выступает среда, а агент является учеником. Агент существует в рамках среды и взаимодействует с ней. Он совершает действие на основе некоторой политики (или алгоритма), например, при управлении автомобилем – поворот руля на некоторый угол. Эти действия (такой поворот руля) влияют на окружающую автомобиль среду, т. е. среда меняется. Агенту передается наблюдение – состояние (что изменилось в среде), в случае автомобиля – информация с лидаров и радаров. Среда реагирует на действия агента и выдает ему баллы (награду) за выполнение (или не выполнение) этих действий, т. е. имеется обратная связь, как в методах автоматического регулирования. Существуют две подгруппы алгоритмов RL:

Первая группа – Model-Free (свободных от модели среды) алгоритмов включает подгруппу Q-leaning (DQN, C51 и др.) и подгруппу алгоритмов с оптимизацией политики (DDPG, SAC, PPO, A3C и др.). Отметим, что эти подгруппы не являются несовместимыми и существует ряд алгоритмов способных выбирать между сильными и слабыми сторонами указанных подгрупп. Примерами являются DDPG – алгоритм, который одновременно изучает детерминированную политику и Q-функцию, используя одну для улучшения другой, и SAC – вариант, который использует стохастические политики, энтропийную регуляризацию и несколько других приемов для стабилизации обучения.

Вторая группа – алгоритмы Model-Based (например: World Models, I2A и др.), которые модель используют. В них среда моделируется (например, в несложных технических системах параметрическая модель среды может быть известна).

В рамках данной статьи будут рассматриваться первая группа алгоритмов, так как реальная модель среды обычно недоступна для агента. Данная группа гораздо более многочисленна чем Model-Based, шире распространена и активно развивается.

Подгруппа Q-обучение

Метод обучения Q-learning, применяемый при агентном подходе в управлении и имитационном моделировании относится к категории RL. Если среда поощряет агента за «правильные» действия (целевая функция Q представляется в виде награды), агент продолжает их совершать, т. е. стимулируем агента совершать хорошие для среды действия. При этом на вход алгоритма не поступает обучающая выборка. Агент должен методом проб и ошибок сам собрать данные при взаимодействии со средой.

Если алгоритмах машинного обучения с учителем при настройке ИНС коррекция происходила за счет минимизации ошибки между ее выходом и эталоном, то здесь источником коррекции является награда. На основе получаемого от среды вознаграждения агент формирует функцию ценности Q, что дает ему возможность уже не случайно выбирать стратегию поведения, а учитывать опыт предыдущего взаимодействия со средой. Чем выше награда, тем лучше для агента, поэтому мы должны макси-

мизировать функцию ценности Q. Заметим, что алгоритмы RL могут напрямую взаимодействовать с моделью и иметь возможность «видеть» результаты своих прошлых действий.

Задача ИИ здесь автоматически научиться вести себя так, чтобы увеличить число вознаграждений. Здесь нейросеть не главное, но она применяется для построения Q-таблицы перехода для всех состояний системы (марковский процесс перехода между состояниями). В системах «без предыстории» оказывается полезен принцип оптимальности Р. Беллмана, который гласит: «если в каждом из состояний дальнейшее поведение системы не зависит от того, как она попала в это состояние, то дальнейшая траектория движения этого состояния должна быть оптимальной».

Идея реализации процесса Q-обучения: выполняем случайные действия, а потом для каждой ячейки в таблице и каждого направления движения, посчитаем по уравнению Беллмана (см. ниже) насколько хороша эта ячейка и выбранное направление. Чем выше получится это число, тем с большей вероятностью получим оптимальный результат. Это число получило название Q (от англ. *quality* – качество выбора), а метод – Q-learning. Заменив формулу расчета этого числа на нейронную сеть, а точнее обучая нейронную сеть по этой формуле, получили метод DQN.

Алгоритм DQN. Рассмотрим данный процесс формально. Среда описывается марковским процессом принятия решений (МППР), который включает S (states) – множество состояний среды; A (actions) – множество возможных действий; условное распределение $P(s'|s,a)$ следующего состояния при условии текущего и действия; R (rewads) – вознаграждения при переходе в новое состояние $R(s,s')$; коэффициента дисконтирования $0<\gamma<1$,который определяет предпочтение текущего вознаграждения по сравнению с будущим.

В произвольный момент времени t агент характеризуется состоянием $s_t \in S$ и множеством возможных действий $A(s_t)$. Выбирая действие $a \in A(s_t)$, он переходит в состояние s_{t+1} и получает выигрыш r_t. Основываясь на таком взаимодействии с окружающей средой, агент, обучающийся с подкреплением, должен выработать оптимальную политику, т. е. стратегию $\pi : S \to A$, которая максимизирует функцию ценности действия Q – математическое ожидание совокупного вознаграждения:

$$Q = E\sum_t \gamma^t r_t, \quad (1)$$

где $0< \gamma < 1$ – дисконтный множитель, E – символ матожидания.

Рекуррентная формула для функции ценности Q имеет вид:

$$Q(s,a) = E(r_t + \gamma Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \mid s_t = s, a_t = a) \quad (2)$$

Уравнение Беллмана для оптимальной функции ценности Q^* имеет вид:

$$Q^*(s,a) = E(r_t + \gamma \max_{a' \in A} Q^*(s_{t+1}, a') \mid s_t = s, a_t = a). \quad (3)$$

Второе слагаемое здесь – награда за оптимальное поведение начиная с s' и далее дисконтированная с коэффициентом γ. Жадная стратегия (с максимальной текущей функцией ценности) выбирать политику π относительно Q^* (s, a) «выбирать то действие, на котором достигается максимум в уравнении Беллмана», является оптимальной, т. е.:

$$A_t = \arg\max_{a' \in A} Q^*(s_t, a). \quad (4)$$

Следующее действие a' выбирается для максимизации Q-значения следующих состояний вместо того, чтобы следовать текущей политике. В результате Q-learning относится к категории вне политики (off-Policy).

В алгоритме DQN функция Q аппроксимируется ИНС при фиксированных параметрах сети w_t: $y_t = r_t$, если состояние s_{t+1} терминальное, иначе

$$y_t = r_t + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a; w_t),$$

где второе слагаемое определяет оптимальную функцию Q^* на основе уравнения Беллмана.

В данном алгоритме на вход нейросети подается текущее состояние (текущая ситуация), а на выходе ИНС предсказывает число Q. Поскольку на выходе ИНС перечислены сразу все возможные действия (каждый со своим предсказанным Q), то получается что она реализует классическую функцию $Q(s, a)$ из Q-learning. Далее выполняется поиск максимального значения по выходам ИНС и выполняем соответствующее действие. Для нейтрализации смещенности оценки Q-функции в алгоритме двойного Q-обучения (DDQN) применяют дополнительную нейросеть, параметры из которой копируются из основной раз в несколько итераций. Тогда используется значение Q-функции из дополнительной сети для действия, выбранного на основе максимального значения Q из основной.

Ограничением алгоритма DQN является невысокая размерность решаемых задач и возможность работы только с дискретными действиями из-за необходимости постоянно вычислять максимумы. В то время как в задачах

управления (например, беспилотным автомобилем или дроном), пространство действий непрерывно.

Методы с оптимизацией политики

Алгоритм DDPG. Вопрос с непрерывностью пространства действий решается в алгоритме DDPG (глубокий градиентный метод), поскольку действия a в отличии от DQN предсказываются напрямую. Метод основан на комбинации алгоритма DPG (deterministic policy gradient) [5, 6] и алгоритма DQN.

В DDPG реализован популярный метод «актор-критик» (актер и критик), представляющую структуру из двух блоков: actor, отвечающего за выработку управляющего действия и блока critic, который служит для оценки успешности действий actor, т. е. определяет, насколько эти действие хороши. Блок critic выдает значение Q-функции для этих действий, как в алгоритме DQN. Блок actor используется для настройки параметра θ функции политики π_θ, т. е. для определения наилучшего действия для определенного состояния.

Оба блока представляют собой глубокие ИНС. Обучение этих сетей и является задачей обучения агента. На вход первой сети подается состояние s и она предсказывает действие $a(s)$. Вторая сеть на вход тоже получает состояние s, но еще и действия a, предсказанные первой сетью, а на выходе возвращает оценку Q как функцию от них обоих: $Q(s,a)$.

Плюс подхода по сравнению с методом Policy Gradient в обновлении весов сети на каждом шаге, не дожидаясь окончания эпизода, что ускоряет обучение. Для повышения частоты поиска действий параметры сети или действия зашумляют. Детали математического описания и реализации метода можно найти в [7].

Алгоритм A3C. Рассматриваемый алгоритм выполняет градиентное восхождение, чтобы напрямую максимизировать производительность. Термин асинхронный в названии Asynchronous Advantage Actor Critic (A3C) означает, что при сборе результатов от множества actor обновление весов выполняется, как только набирается батч нужного размера. При этом не происходит ожидания каждого actor, что позволяет убрать из примеров ненужную корреляцию и, таким образом, улучшить обучение.

Механизм метода заключается в следующем: для обучения первой сети не просто используют предсказания critic числа $Q(s, a)$ (насколько хороши действия, предсказанные актером actor), а насколько эти предсказанные действия оказались лучше или хуже, чем мы ожидали. Для этого при расчете градиентов стали использовать не значение $Q(s, a)$, а так называемое Advantage:

$$A(s, a) = Q(s, a) - V(s),$$

где значение $A(s, a)$ показывает на сколько преимущество выбранных действий станет лучше, чем текущая ситуация $V(s)$.

Если $A(s, a) > 0$, то градиент будет изменять веса нейросети, поощряя предсказанные сетью действия. В противном случае градиент будет изменять веса так, что предсказанные действия будут подавляться.

В варианте реализации, когда $Q(s, a)$ заменяют на награду r, определяемую после совершения действия, достаточно предсказывать только $V(s)$. Это позволяет две сети actor и critic заменить на одну, сократив таким образом количество нейронов. На входе этой сети состояние s, а на выходе два результата: предсказание действия a и $V(s)$. Учет и предсказание сетью качества текущей ситуации $V(s)$ помогает ускорить обучение. Поскольку при низком качестве $V(s)$, где уже ничего нельзя исправить ни при каких действиях, можно не искать дальнейшие решения. Более детально описание и реализацию метода можно почерпнуть из [8].

Алгоритм PPO. Метод можно использовать для сред с дискретными или непрерывными пространствами действий. Разработан с целью обеспечить компромисс между простотой реализации, сложностью выборки и простотой настройки, пытаясь вычислить обновление на каждом шаге, которое минимизирует функцию стоимости. Цель подхода – получить наибольшее возможное улучшение результатов за один шаг на основе тех данных, что уже имеются и при этом не ухудшить текущие показатели эффективности политики.

Алгоритм тренирует стохастическую политику придерживаясь существующий политики, иначе говоря, исследует возможные новые действия на основе уже существующей политики. Это позволяет избегать резких выбросов, которые портят прошлый опыт, чем страдают алгоритмы A2C/A3C. Правила алгоритма подразумевают, что действия, которые приносили хорошие награды в прошлом, должны продолжать использоваться далее. PPO выбирает наилучшее действие на основе текущих наблюдений агента в текущий момент времени.

В основе алгоритма архитектура actor – critic. Актер сопоставляет наблюдение с действием, а критик выдает ожидание вознаграждения агента за предоставленное наблюдение.

Критик собирает набор траекторий для каждой эпохи путем выборки из последней версии стохастической политики. Политика обновляется с помощью оптимизатора стохастического градиентного подъема. В отличии от стандартных методов градиента политики, которые выполняют одно обновление градиента для каждой выборки данных, здесь используются несколько эпох стохастического градиентного подъема для выполнения каждого обновления политики. Следует отметить следующие две особенности, важные для применения: если алгоритм находит эффективную стратегию, то он продолжит придерживаться ее, тем самым создается риск попасть в так называемый «локальный оптимум»; работает быстрее и эффективнее на простых средах, в которых мала вероятность нахождения не стандартных способов решения проблемы. Подробно описание и реализацию метода изложена в [9].

Алгоритм SAC. Мягкий actor-critic (Soft Actor Critic) – это алгоритм, который оптимизирует стохастическую политику действий, не опираясь на существующую политику.

Основной особенностью SAC является регуляризация энтропии. Политика действий создается таким образом, что оптимизироваться компромисс между ожидаемой наградой и энтропией, которая является показателем случайности в политике действий. Данный компромисс тесно связан с отношением между эффективностью и исследованием внутри политики действий. Чем выше энтропия, тем больше возможных новых вариантов действий у агента рассматривается в процессе обучения. Это позволяет избегать локальных оптимумов и повышает надежность политики, поскольку агент становится готов к любым случайным ситуациям. Кроме того, SAC требует немного меньше примеров для обучения, чем PPO, и менее чувствителен к настройке гиперпараметров, что тоже плюс. Подробно математическое описание и реализацию метода можно извлечь из основной статьи [10].

IMPALA (Importances Weighted Actor-Learner Architectures) Алгоритм представляет собой масштабируемое решение для распределенного обучения на базе архитектуре A3C на основе обучения действующего персонажа со взвешиванием важности), которое использует новый алгоритм коррекции политик без необходимости остановок для синхронизации.

Идея подхода состоит в следующем. Периодически актеры останавливаются и обмениваются вычисленными градиентами для синхронизации настроек политики. Актеры в IMPALA вместо вычисления градиентов накапливают опыт, который передается “главному обучающемуся”, который и рассчитывает градиенты, формируя модель, в которой действуют независимые актеры и обучающиеся.

Разделение обучения и действия обеспечивает рост производительности всей системы, поскольку актерам более не нужно ожидать каждого отдельного шага в процессе обучения, как это требовалось в архитектурах типа A2C.

Разделение процесса действий и обучения приводит к тому, что политика каждого актера отстает от политики, формируемой главным обучающимся. Чтобы справиться с этой проблемой, в DeepMind используют алгоритм коррекции политик V-trace, который обеспечивает компенсацию траекторий актеров.

Решение IMPALA, как отмечено в [11], ускорило обучение алгоритма на 1-2 порядка по сравнению с другими подходами, что позволяет решать задачи обучения действиям в сложной внешней среде. Обучаемость системы почти линейно растет с повышением задействованных вычислительных ресурсов, что позволяет наращивать число одновременно действующих актеров и обучающихся при объединении в сеть сотен или тысяч вычислительных машин.

Результаты тестирования показывают, что данный алгоритм может достигать более высокой производительности (в 10 раз) по сравнению с распределенной реализацией A3C. Решение, демонстрирует положительный перенос между задачами в результате своего многозадачного подхода. Кроме того, IMPALA позволила перейти от обучения в одной среде, к обучению в мультисредах.

Заключение

В представленном кратком обзоре были рассмотрены особенности ряда систем имитационного моделирования, использующих обучение с подкреплением, а также некоторые концепции реализованных в них алгоритмов RL из подгруппы Free-Model. Помимо высокой вычислительной трудоемкости, связанной с известной проблемой поиска методом проб и ошибок, имеются также и методические трудности. Как говорилось выше, в роли модели среды может выступать имитационная модель в комбинации с нейронной сетью. Даже если такая модель среды агентом хорошо изучена, это вовсе не означает, что с реальными данными будет получен хороший результат. Недостатки нейросетевых аппроксиматоров известны – слабая интерпретируемость, высокая чувствительность к изменению условий и, как следствие низкая обобща-

ющая способность. Как только что-то в среде меняется (появление шума, изменение входа) нейросеть не справляется. До изменений стратегия была оптимальной, после них происходит ее нарушение.

Несмотря на вышеизложенное утверждение, все же существуют задачи и алгоритмы, которые для конкретных объектов демонстрируют весьма близкие к реальным средам результаты работы.

В качестве примера можно привести результаты по выбору лучшего алгоритма при моделировании автономного вождения [14]. Лучший алгоритм обучения с подкреплением для сформулированной задачи среди современных алгоритмов, таких как DDPG, PPO, SAC, DQN и других. В результате проведенного обучения и тестирования было выявлено, что лучшим алгоритмом для данной задачи является A2C.

Резюмируя результаты приведенного обзора, общая рекомендация для применения RL для получения лучших результатов как по точности, так и по производительности, следует использовать в порядке по убыванию: SAC, PPO, DDPG, DQN. При наличии соответствующих вычислительных ресурсов лидирует IMPALA.

Библиографический список

1. *Борщев А. В., Махдави А.* Имитационные модели – виртуальная среда для обучения и тестирования ИИ для бизнес-приложений // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2019). Екатеринбург, 2019, 20-29. URL: https://www.anylogic.ru/resources/educational-videos/imitatsionnye-modeli-virtualnaya-sreda-dlya-obucheniya-i-testirovaniya-ii-dlya-biznes-prilozheniy/ (дата обращения: 08.11.2022).

2. *Андронов С. А., Прокофьева М. С.* Сравнительная оценка эффективности алгоритмов машинного обучения с подкреплением и оптимизации при управлении транспортными процессами в среде Anylogic // Системный анализ и логистика: журнал. № 2 (32). С. 22–41.

3. *Kaelbling L. P*, *Littman M. L.*, *Moor A. V.* Reinforcement Learning: A Survey // Journal of Artificial Intelelligence Research. 4 (1996). С. 237–285

4. Документация MATLAB. URL: https://docs.exponenta.ru/reinforcement-learning/getting-started-with-reinforcement-learning-toolbox.html, (дата обращения: 08.11.2022).

5. *Silver D.* et al. Deterministic Policy Gradient Algorithms // Proceedings of The 31st International Conference on Machine Learning. 2014. С. 387-395. Witten I. H. et al. Data Mining: Practical machine learning tools and techniques. Morgan Kaufmann, 2016.

6. Deep Deterministic Policy Gradient. URL: https://spinningup.openai.com/en/latest/algorithms/ddpg.html (дата обращения: 08.11.2022).

7. *Timothy P. Lillicrap*, *Jonathan J. Hunt*, *Alexander Pritzel* et al. CONTINUOUS CONTROL WITH DEEP REINFORCEMENT LEARNING // Conference ICLR. 2016. URL: https://arxiv.org/pdf/1509.02971.pdf (дата обращения: 08.11.2022).

8. *Mnih V.* et al. Asynchronous Methods for Deep Reinforcement Learnin. 2016. URL: https://arxiv.org/pdf/1602.01783.pdf (дата обращения: 08.11.2022).

9. *Schulman J.* et al, Proximal Policy Optimization Algorithms, 2017. URL: https://arxiv.org/pdf/1707.06347.pdf, (дата обращения: 08.11.2022).

10. *Haarnoja T.* et al. Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor, 2018. URL: https://arxiv.org/abs/1801.01290, (дата обращения: 08.11.2022).

11. *Espeholt L.* et al. IMPALA: Scalable Distributed Deep-RL with ImportanceWeighted Actor-Learner Architectures, 28 Jun 2018. URL: https://arxiv.org/abs/1802.01561 (дата обращения: 08.11.2022).

12. AirSim on Unity. URL: https://microsoft.github.io/AirSim/Unity/ (дата обращения: 08.11.2022).

13. RLPy. The Reinforcement Learning Library for Education and Research. URL: https://rlpy.readthedocs.io/en/latest/ (дата обращения: 08.11.2022).

14. *Kabanov Stepan*, *Mitiai German*, *Wu Haitao*, *Petrosian Ovanes*. Comparison of Reinforcement Learning Based Control Algorithms for One Autonomous Driving Problem. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-16224-4_24 (дата обращения: 08.11.2022).

УДК 656.7.025

А. Д. Афанасьева*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОЗОК ОПАСНЫХ ГРУЗОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В ФИНЛЯНДИЮ ВОЗДУШНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Статья посвящена исследованию организации перевозки едкого натра из России в Финляндию воздушным транспортом. В работе определены типы грузовых воздушных судов на воздушной трассе Санкт-Петербург – Хельсинки – Оулу. Произведен анализ данных метеорологического минимума и рассчитано количество дней нелетной погоды рассматриваемых аэропортов. На основе полученных данных произведен расчет потребного количества складских площадей на территории «Грузового терминала Пулково» и средств складской и перронной механизации. Обоснованы расчетами предложения по доставке части партии груза железнодорожным транспортом в условиях коллапса воздушных перевозок.
Ключевые слова: *опасный груз, воздушный транспорт, организация перевозки, авиационный контейнер, летный ресурс, средства механизации, метеорологический минимум.*

A. D. Afanasieva*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentatio*

FEATURES OF TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS FROM ST. PETERSBURG TO FINLAND BY AIR

The article is devoted to the study of the organization of transportation of caustic soda from Russia to Finland by air. The paper defines the types of cargo aircraft on the St. Petersburg-Helsinki-Oulu air route. The analysis of the meteorological minimum data was carried out and the number of days of non-flying weather at the airports under consideration was calculated. Based on the data obtained, the calculation of the required amount of warehouse space on the territory of the Pulkovo Cargo Terminal and the means of warehouse and apron mechanization was made. The proposals for the delivery of part of the consignment by rail in the conditions of the collapse of air transportation are justified by calculations.
Keywords: *dangerous cargo, air transport, organization of transportation, aviation container, flight resource, means of mechanization, meteorological minimum.*

Введение

Рынок авиауслуг в России постоянно растет и является одним из крупнейших в мире. В решении задачи дальнейшего повышения эффективности и качества авиатранспортного производства ведущая роль принадлежит самолетно-вертолетному парку. От темпов развития авиации, технического совершенства и экономичности воздушных судов, их рационального использования зависят степень удовлетворенности спроса на воздушные перевозки, регулярность и безопасность полетов, качество обслуживания пассажиров и грузовой клиентуры, рентабельность работы авиапредприятия.

Настоящая работа посвящена исследованию организации перевозки едкого натра из Санкт-Петербурга (Россия) в Оулу (Финляндия) воздушным транспортом. Данный вопрос тесно связан с технологией погрузки и пакетирования едкого натра как груза повышенной опасности, а также зависимости воздушного сообщения от погодных условий. В этой связи, исследования условий обеспечения поставки едкого натра в международном воздушном сообщении представляются достаточно актуальными.

Характеристика аэропортов

Аэропорт Пулково входит в состав Санкт-Петербургского транспортного узла, соответствует стандартам сертификации и обслуживания гражданских аэродромов. Общая площадь аэропорта: 1350 га.

Размеры летного поля аэродрома 4300×5250 м. На аэродроме имеются две взлетно-посадочных полосы с искусственным покрытием: ИВПП-1 – 10R/28L – размеры: 3780×60 м; ИВПП-2 – 10L/28R – размеры: 3397×60 м. ИВПП позволяют выдерживать при взлете и посадке любые типы воздушных судов как пассажирской, так и грузовой авиации, в том числе самый крупный на настоящий момент грузовой самолет Boeng 747-8F.

На территории, аэропорта Пулково находятся: ФГУП «ГТК «Россия»; ЗАО ТЗК «Совэкс»; АО «Грузовой терминал аэропорта «Пулково».

АО «Грузовой терминал Пулково» – крупнейший грузовой авиационный терминал в Северо-Западном Федеральном округе. Терминал обеспечивает обслуживание и хранение в аэропорту Пулково всех видов грузов, в том числе опасных грузов следующих классов и категорий: 1.4S; 1.6; 2.1; 2.2; 3; 4.1; 5.1; 5.2; 6; 7 (кроме ДЯМ) 8 и 9; тяжеловесного, негабаритного и длинномерного груза; скоропортящегося, специального груза и груза, следующего под таможенным контролем [1].

Терминал обладает необходимым оборудованием для погрузки/разгрузки груза, его транспортировки и взвешивания: аккумуляторные погрузчики ЭП-103 и ЭП-106 – 14 ед.; дизельные погрузчики DEG-30 и DEG-20 – 10 ед.; автомобили с подъемным кузовом АПК-10 и АПК-К – 11 ед.; тягачи для контейнерных и паллетных телег АК-6 – 3 ед.; паллетные тележки грузоподъемностью до 20 тонн и контейнерные тележки ТК-2А – 24 ед.; подъемно-комплектовочные столы ПКС-15 – 2 ед.; контейнерные штабелеры ШК-10 – 2 ед.; роликовые эстакады и роликовые дорожки – 13 ед.; весы передвижные – 4 ед.; кран мостовой МК-15 – 1ед.; рампа грузовая (тракдок) РГ-50 – 2 ед.; перегружатели «TREPEL» грузоподъемностью до 30 тонн – 4 ед.; конвейеры ленточные самоходные – 4 ед.; ручные тележки – 5 ед.

Данными средствами механизации грузовой комплекс способен обеспечить переработку до 274 тонн в сутки [2, 3].

Техническая характеристика АО «ГТ Пулково»

Грузовой терминал обеспечивает обслуживания всех типов ВС, допущенных к приему в аэропорту Пулково. Общая территория грузового комплекса составляет 4,7 га. Производственные площади составляют 12000 м^2. Площадь складских помещений и зоны приема-выдачи груза 6000 м^2. Площадь склада временного хранения 2481.00 м^2. Вместимость грузового терминала до 1092 т. Пропускная способность 274 т/сутки. Общий грузооборот составляет 100 тыс. т груза в год [1]. Общий вид аэропорта Пулково и АО «ГТ Пулково» на рис. 1.

Аэропорт Хельсинки-Вантаа – международный аэропорт столицы Финляндии Хельсинки. Аэропорт расположен в городе Вантаа, под управлением Finavia. Общая площадь аэропорта: 650 га, внеклассный [4].

Аэропорт имеет три взлетно-посадочных полосы: 04R/22L длина 3500 м; 04L/22R длина 3060 м; 15/33 длина 2901 м.

Таким образом, даже взлеты и посадки таких тяжелых самолетов, как Airbus A380, Boeng 747-8F взлетно-посадочные полосы аэропорта способны принимать [4], рис. 2, *а*.

Аэропорт Хельсинки-Вантаа – один из крупнейших аэропортов по грузовым авиаперевозкам в Северных странах. В 2012 г. аэропорт обработал 192,204 тонн грузов [4].

Новый грузовой терминал площадью 35 000 м^2, открылся 8 января 2018 г. Здесь начались грузо-

а) б)

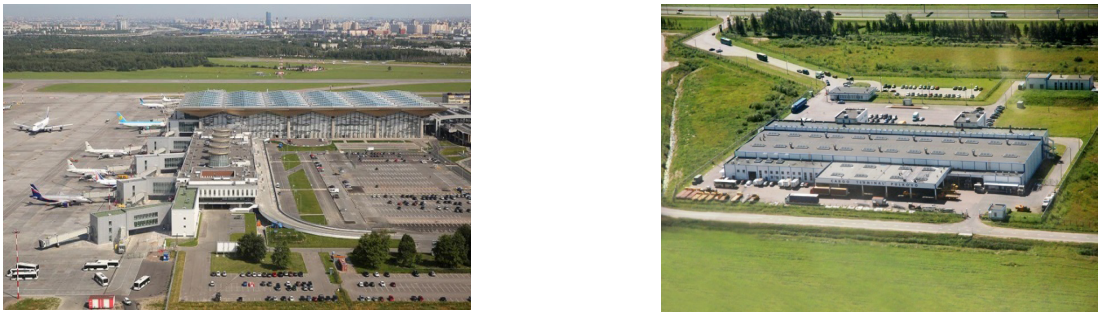


Рис. 1. Общий вид аэропорта Пулково и «ГТ Пулково»: а – аэропорт Пулково; б – АО «ГТ Пулково»

а) б)

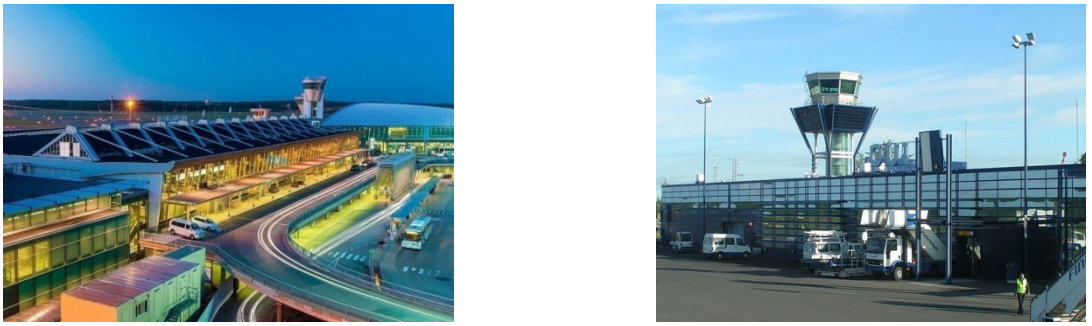


Рис. 2. Аэропорт Вантаа и Оулу: а – аэропорт Хельсинки-Вантаа; б – аэропорт Оулу

вые операции Finnair. Пропускная способность терминала составляет 350 тыс. т, теоретически – до 450 тыс. т.

Аэропорт Оулу – расположен в Оулунсало. Это второй аэропорт Финляндии по пассажиропотоку после Хельсинки-Вантаа; в 2011 г. через него прошло 973 912 пассажиров и значительный объем грузов. Управляющая компания аэропорта –Finavia. Связан с Хельсинки-Вантаа двенадцатью ежедневными рейсами, рис. 2, *б* [5].

В аэропорту Оулу одна взлетно-посадочная полоса длиной 2,5 км и шириной 60 м, оснащенная системой посадки по приборам (ILS) категории II [5].

Транспортные характеристики перевозимого груза

Гидроксид натрия (едкий натр, каустическая сода) – одна из самых распространенных щелочей, твердая сплавленная масса желтоватого или белого цвета, выпускается в жидком виде и в форме мелких белых гранул, не имеет собственного аромата. Химическая формула NaOH. Основными потребителями гидроксида натрия сегодня являются следующие отрасли народного хозяйства: в первую очередь бумажная промышленность, химическая, автомобильная, металлургическая, газовая и нефтяная, текстильная, пищевая [2].

Едкий натр относится к классу опасных грузов 8, подкласс 8.2 (едкие и (или) коррозионные вещества, обладающие основными свойствами). Аварийная карточка № 808, для твердого продукта – транспортное наименование «НАТРИЯ ГИДРОКСИД ТВЕРДЫЙ», номер ООН 1823, или «НАТРИЯ ГИДРОКСИДА РАСТВОР» номер ООН 1824, классификационный шифр 8012. Воздушным транспортом в данной работе в качестве тары используются мешки из полимерной ткани влагопрочные 5Н3 по 25 кг. На европаллете размещается 40 мешков, весом в 1 т. На фин. паллете 48 мешков, весом в 1,2 т (рис. 3).

Грузоотправителем является ООО НПФ «Невский химик» – научно-производственная фирма, производитель малотоннажных химических реагентов и особо чистых веществ. Объем производства каустической соды на НПФ составляет около 70 тыс. т в год [6].

Грузополучатель – Stora Enso Oyj (финско-шведская лесопромышленная компания, одна из крупнейших в мире). Штаб-квартира – в Хель-

а) б) в) г)

Рис. 3. Каустическая сода, общий вид, транспортная упаковка и маркировка:
а – NaOH гранулированный; б – мешок 25 кг; в – укладка мешков на паллете; г – знак опасности

синки. Основной целлюлозно-бумажный завод в г. Оулу. Компания специализируется на производстве различных сортов бумаги, целлюлозы, продуктов деревообработки [3].

За год целлюлозно-бумажный комбинат Stora Enso в Оулу производит 2,6 млн т бумаги и картона, на производство которой уходит 7,8 кг каустической соды на тонну бумаги. Таким образом, поставки едкого натра на предприятие Stora Enso из компании ООО НПФ «Невский химик» составит 20280 т/год или 1690 т/мес.

Технология размещения едкого натра на видах транспорта

Расстояние по маршруту Санкт-Петербург-Хельсинки составляет 300 км, время в пути – 1 час. Рейс выполняет авиакомпания Finnair. Перевозка может производится самолетами A330-200F и Ил-76Т, имеющие грузоподъемность 70 и 60 т соответственно. Средства пакетирования универсальные авиационные контейнеры и транспортные пакеты на паллетах.

На самолетах типа A330-200F будут использоваться до 27 контейнеров AKE LD3 в нижнем грузовом отсеке и до 22 контейнеров AMA M1 в верхней грузовой кабине (рис. 4).

Общий вес мешков в 27 контейнерах по 51 мешку в нижнем грузовом отсеке будет равно 34425 кг. Общий вес мешков в 22 контейнерах по 219 мешков в верхней грузовой кабине будет равно 120450 кг. Вполне очевидно, что перевозку есть смысл осуществлять только в контейнерах AMA M1.

Учитывая, что грузоподъемность данного самолета составляет 70 т, возможное количество контейнеров на полную грузоподъемность составит 70000 : 5825 = 12 единиц. Их общий вес нетто равен 5475 · 12 = 65700, брутто будет равен 5825 · 12 = 69900 кг.

Принимая во внимание, что общий объем поставок едкого натра составит 20280 т/год или 1690 т/мес., для обеспечения годовой поставки потребуется 20280 : 65,7 = 309 рейсов; месячная поставка обеспечивается 20280 : 65,7 : 12 = 26 рейсов.

При перевозке в паллетах лучшим вариантом размещения груза будет в 57 фин. паллетах вдоль грузового отсека с полезной нагрузкой 68,4 т.

Следовательно, для обеспечения годовой поставки потребуется 297 рейсов; месячная поставка обеспечивается 25 рейсов.

На самолетах Ил-76Т будут использованы до 9 УАК-5 совместно с 2 УАК-2,5 на полную грузоподъемность самолета. Тогда общий вес едкого натра равен: нетто 45450 кг; брутто 47920 кг. Следовательно, для обеспечения годовой поставки потребуется 447 рейсов; месячная поставка обеспечивается 38 рейсов.

Используя паллеты, лучшим вариантом размещения груза будет 49 фин. паллет в один ярус с полезной нагрузкой 58,8 т (рис. 5). Следовательно, для обеспечения годовой поставки потребуется 345 рейсов; месячная поставка обеспечивается 29 рейсами.

Показатели использования самолетов A330-200F и Ил-76Т для перевозки едкого натра контейнерным и пакетным способом представлены в табл. 1.

По данным таблицы можно сделать следующие выводы: сравнительный анализ организации поставок едкого натра по заданному маршруту выбранными типами воздушных судов показал, что для последующих расчетов общее число совместных рейсов при перевозке составит:

– контейнерами 183 рейса в год и 15-16 рейсов в месяц. Т. е. 110/10 рейсов A330-200F, 73/6 рейса Ил-76Т год/месяц, соответственно. Транспортная загрузка 12×AMA M1 в A330-200F и 9хУАК-5+2хУАК-2,5 в Ил-76Т;

– пакетами 160 рейса в год и 13-14 рейсов в месяц, т. е. 87/8 рейсов A330-200F, 73/6 рейса Ил-76Т год/месяц, соответственно. Транспортная загрузка 57 фин. паллет в A330-200F и 49 фин. паллет в Ил-76Т.

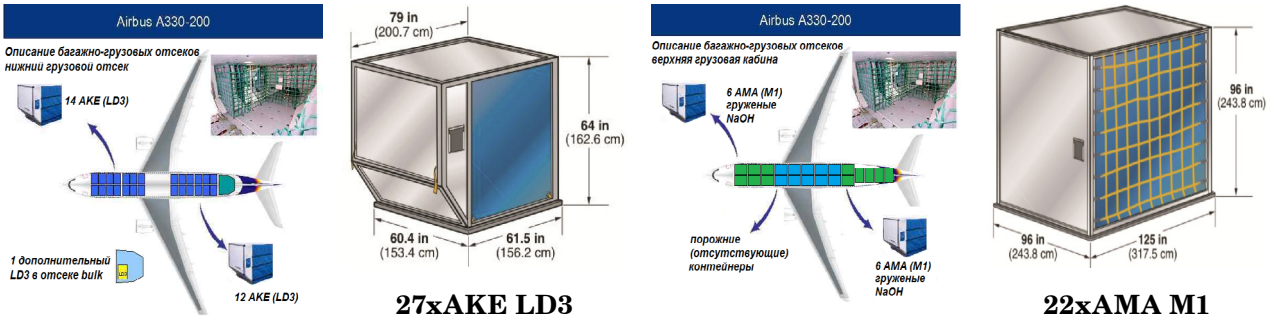


Рис. 4. Размещение контейнеров в отсеках самолета A330-200F

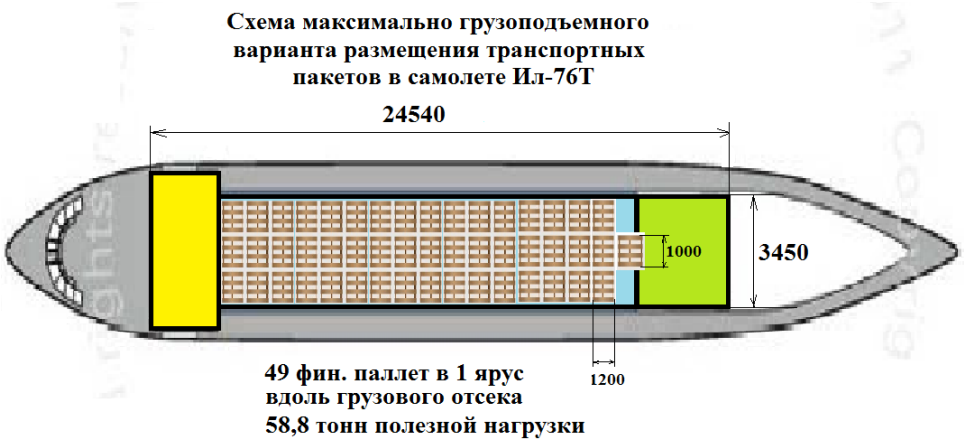


Рис. 5. Схема размещения транспортных пакетов в Ил-76Т

Таблица 1

Показатели тоннажа разовой загрузки самолетов различными способами, тонн (годового/месячного числа рейсов лучших вариантов погрузки)

Тип ВС	Контейнеры			Пакеты			
	27×AKE LD3	12×AMA M1	9×УАК-5+ +2хУАК-2,5	68 евро паллет	58 евро паллет	57 фин. паллет	49 фин. паллет
A330-200F	34,425	65,7 (309/26)	–	68,0	–	68,4 (297/25)	–
Ил-76Т	–	–	45,45 (447/38)	–	58,0	–	58,8 (345/29)

Авиационно-климатическая характеристика аэропортов Пулково, Хельсинки

Аэропорты Пулково и Вантаа по длине ВПП и метеоусловиям относятся к I категории, тем не менее, за счет установленного современного навигационного оборудования позволяют снизить показатели своего метеоминимума.

Закрытие аэродрома Пулково для вылетов и посадок всех типов воздушных судов производится при следующих метеоусловиях: видимость менее 350 м, ветер 15 м/сек и более, направление 180 или 360 град., коэффициент сцепления на ВПП 0,3 и менее.

На аэродроме Вантаа прекращаются полеты всех типов самолетов при следующих метеоусловиях: видимость менее 400 м, ветер 15 м/сек и более, высота нижней границы облаков менее 100 м коэффициент сцепления на ВПП 0,3 и менее.

Среднестатистические данные о повторяемости опасных явлений погоды и сложных метеоусловий по месяцам, по данным метеостанций Санкт-Петербург, и Хельсинки приведены в таблицах источников [7, 8, 9].

Значение коэффициента летной погоды в месяце q в аэропорту k определяется по формуле:

$$\mu_{kq} = \prod_{i=1}^{n}(1 - D_i), \qquad (1)$$

где D_i– процент дней нелетной погоды (дней со сложными метеорологическими условиями) в месяце по видам ограничений (гроза, туман и т. д.); n – количество видов ограничений.

Определенные по формуле (1) значения нелетной погоды представлены в табл. 2.

Данные таблицы свидетельствуют, что в аэропорту Вантаа в течение 8 месяцев процент дней нелетной погоды превышает 30% и наибольшее значение таких явлений наблюдается в феврале – 36%. Очевидно, что в этот период аэропорт не сможет принимать воздушные суда, в том числе из Пулково. Следовательно, необходимо иметь запас складских помещений или открытых и контейнерных площадок для размещения дополнительного объема груза (не менее 36%), который по метеоусловиям не сможет быть переработан.

Наибольшее число дней нелетной погоды в аэропорту Пулково наблюдается в январе –

Таблица 2

Общее число нелетных дней и дней со сложными метеорологическими условиями на СЗ воздушных трассах

Метеорологическая станция	Метеорологические условия I		Месяцы					
			II	III	IV	V	VI	
Санкт-Петербург (Пулково)	Опасные	%	**31,9**	24,6	20,6	17,8	13,3	**10,6**
		дни	9,9	6,9	6,4	5,3	4,1	3,2
	Сложные	%	29,4	25,4	21,9	28,0	27,7	34,7
		дни	9,1	7,1	6,7	8,4	8,6	10,4
Хельсинки (Вантаа)	Опасные	%	34,8	**35,9**	35,7	26,7	**21,9**	26,5
		дни	11,9	10,1	11,1	7,9	6,8	8,0
	Сложные	%	31,4	27,9	21,7	17,2	11,7	16,3
		дни	9,7	7,8	6,7	5,2	3,6	4,9

Метеорологическая станция	Метеорологические условия VII		Месяцы					
			VIII	IX	X	XI	XII	
Санкт-Петербург (Пулково)	Опасные	%	16,9	21,2	18,7	17,4	22,7	20,9
		дни	5,3	6,6	5,6	5,4	6,8	6,5
	Сложные	%	36,6	35,3	31,4	30,4	32,1	29,8
		дни	11,4	10,9	9,4	9,4	9,6	9,2
Хельсинки (Вантаа)	Опасные	%	31,9	32,3	30,8	25,3	30,6	33,6
		дни	9,9	10,0	9,2	7,8	9,2	10,4
	Сложные	%	6,0	10,7	15,4	27,0	32,7	33,6
		дни	1,8	3,3	4,6	8,4	9,8	10,6

Примечание: *таблица составлена по данным* [7, 8, 9].

32%, 8 месяцев в году процент дней нелетной погоды колеблется от 16% до 23%.

С целью недопущения срыва плановых поставок при неблагоприятных погодных условиях, исключающих полеты воздушных судов с аэропорта Пулково, доставку едкого натра заказчику можно временно осуществлять железнодорожным транспортом в цельнометаллических вагонах модели 11-217. Маршруты перевозки едкого натра различными способами представлены на рис. 6.

Наиболее экономичным и грузоподъемным представляется вариант загрузки вагона 32 транспортными пакетами, установленными в 2 яруса с использованием евро паллет и общей полезной нагрузкой в 64 т. Схема размещения паллет в вагоне представлена на рис. 7.

Расчет потребного количества контейнеров для выполнения перевозки

Расчет определения потребного количества контейнеров для выполнения заданного объема перевозок состоит из двух этапов: на первом этапе определяется время оборота контейнеров; на втором этапе определяется необходимая потребность в контейнерах, исходя из заданного объема перевозок, имеющихся в наличии типов контейнеров и времени их оборота. Время оборота контейнеров определяется по формуле:

$$T_{\text{ОБ}}^{\text{К}} = \frac{\frac{2L_{\text{ср}}}{V_{\text{ср}}} + t_1 + t_2}{24}, \text{ сут} \qquad (2)$$

где $L_{\text{ср}}$ – среднее расстояние доставки контейнеров, км; $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость доставки контейнеров, км/ч; t_1 – время нахождения контейнеров в аэропорту назначения, ч; t_2 – время нахождения контейнеров в аэропорту отправления, ч.

Нормативы времени стоянок грузовых самолетов под погрузо-разгрузочными операциями в базовых, конечных аэропортах строго регламентированы. Принимается, что время нахождения контейнеров в аэропорту отправления и назначения будет равно для А330-200F – 16 часов, для Ил-76Т – 14 часа.

Расчеты по формуле (2) показывает, что время оборота контейнеров: при перевозке самолетами А330-200F составит 1,37 суток, при перевозке самолетами Ил-76Т – 1,2 суток.

Исходя из условия, что 60% опасных грузов перевозится транспортными самолетами А330-200F, а 40% опасных грузов – Ил-76Т, при этом на самолетах А330-200F перевозятся контейнеры типоразмера АМА М1, а на Ил-76Т-комплект

Рис. 6. Схема перевозки едкого натра различными способами

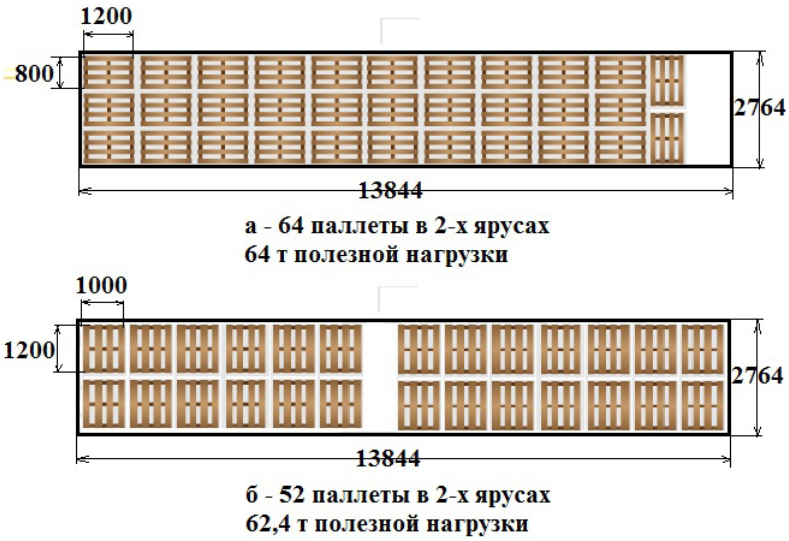


Рис. 7. Схемы размещения паллет в вагоне модели 11-217

9хУАК-5(37% всего груза) и 2хУАК-2,5 (3% всего груза), при этом объемы опасных грузов распределяются следующим образом:

– при перевозке АМА М1 составит 12168 т/год или 1014 т/месяц;

– при перевозке УАК-5 – 7504 т/год или 625 т/месяц;

– при перевозке УАК-2,5 – 608 т/год или 51 т/месяц.

Определяется потребное количество контейнеров по типам для перевозки заданного объема грузов за год и за месяц:

$$N_{\text{К}}^{\text{год}} = \frac{Q_{К}^{\text{план}}}{G_{\text{К}} \times \text{К}}, \text{ контейнеров} \qquad (3)$$

где $Q_{\text{К}}^{\text{план}}$ – объем перевозок в данном типоразмере контейнера, т; $G_{\text{К}}$ – грузоподъемность кон-

тейнера, т; К – коэффициент использования грузоподъемности, 0,85.

Расчеты по формуле (3) показывают потребное количество контейнеров год/месяц:

– при перевозке АМА М1 составит 2220 / 185 контейнеров;

– при перевозке УАК-5 составит 1629/ 136 контейнеров;

– при перевозке УАК-2,5 составит 300 / 26 контейнеров.

Потребное количество контейнеров за месяц с учетом времени их оборота определяется по формуле:

$$N_{К}^{мес} = N_{К}^{мес} \cdot T_{об},\ \text{контейнеров} \qquad (4)$$

Произведем расчет месячного потребного количества контейнеров АМА М1; УАК-5 и УАК-2,5 соответственно с учетом времени их оборота. Он составит: 254 контейнеров АМА М1; 164 контейнеров УАК-5; 32 контейнеров УАК-2,5.

С учетом накопления контейнеров на контейнерной площадке в результате максимального показателя дней нелетной погоды в аэропорту Хельсинки – Вантаа в феврале – 35,9% количество контейнеров будет равно: 346 контейнеров АМА М1; 223 контейнеров УАК-5; 44 контейнеров УАК-2,5.

Среднесуточный объем перевозок рассчитывается по формуле:

$$Q_{К}^{сут} = \frac{Q_{К}^{план}}{T^{план}},\ \text{т} \qquad (5)$$

где $T^{план}$ – планируемое время перевозки, 365 сут.

Среднесуточный объем перевозок в контейнерах АМА М1; УАК-5 и УАК-2,5 составляет 33,34, 20,56 и 1,67 т/сут соответственно.

Произведем расчет суточной потребности в контейнерах АМА М1; УАК-5 и УАК-2,5 составляет 6, 5 и 1 единицу соответственно.

Потребное количество контейнеров с учетом времени их оборота определяется по формуле:

$$N_{К}^{пот} = N_{К}^{сут} \cdot T_{об},\ \text{контейнеров} \qquad (6)$$

Произведем расчет потребного количества контейнеров АМА М1; УАК-5 и УАК-2,5 соответственно с учетом времени их оборота по формуле (6). Оно составляет 9, 6 и 3 единицы соответственно.

Определение размеров контейнерной площадки

При осуществлении перевозок все типоразмеры контейнеров перерабатываются на грузовом комплексе аэропорта. Поэтому для обеспечения перевозок опасных грузов в составе грузового комплекса необходимо иметь контейнерную площадку емкостью равной [10, 11]:

$$E_{кп} = N_{К}^{мес} \cdot К_{н} \cdot T_{хр}^{ср},\ \text{контейнеров} \qquad (7)$$

где $E_{кп}$ – емкость контейнерной площадки, контейнеров; $К_{н}$ – коэффициент неравномерности поступления контейнеров на контейнерную площадку (коэффициент неравномерности поступления контейнеров на контейнерную площадку принимаем равным 1,05); $T_{хр}^{ср}$ – среднее время хранения контейнеров на контейнерной площадке, 0,67 сут.

Контейнеры устанавливаются на контейнерной площадке в два яруса. Поэтому рабочая площадь контейнерной площадки будет определяться:

$$F_{раб} = 0{,}5 \cdot E_{кп} \cdot S,\ м^2 \qquad (8)$$

где $E_{кп}$ – емкость контейнерной площадки; S – площадь, занимаемая одним контейнером, соответственно АМА М1, УАК-5, УАК-2,5 м^2

$$S = a \cdot b,\ м^2 \qquad (9)$$

где a – длина контейнера, м; b – ширина контейнера, м

Расчет площади, занимаемой проходами и проездами, производится по формуле:

$$F_{пр} = F_{раб} \cdot (К_{пр} - 1),\ м^2 \qquad (10)$$

где $F_{пр}$ – площадь, занимаемая проходами и проездами; $F_{раб}$ – рабочая площадь контейнерной площадки; $К_{пр}$ – коэффициент, учитывающий потребность в дополнительной площади внутри площадки занятой проездами и проходами, 1,5.

Таким образом, общая площадь контейнерной площадки будет равна:

$$F_{общ} = F_{раб} + F_{пр},\ м^2 \qquad (11)$$

Расчеты, произведенные по формулам (7), (8), (9), (10), (11) показывают, что площадь, которую занимают контейнеры, необходимую для перевозки едкого натра составляет 1734,9 м^2. С учетом увеличения площади в феврале на 35,9% составляют 2358 м^2.

Расчет потребной численности средств механизации для обработки контейнеров

В современных грузовых комплексах аэропортов большая часть операций по перевозке грузов выполняется с помощью средств механизации.

Средства механизации, применяемые для обслуживания грузовых перевозок на воздушном транспорте, подразделяются на следующие группы:

1. Средства механизации для внутрискладской транспортировки и укладки грузов.

2. Средства механизации для внутриаэродромной транспортировки грузов.

3. Средства внутрисамолетной механизации.

Анализ технической базы АО «ГТ Пулково» позволили произвести расчеты потребности в данных средствах механизации, которые показали: [1, 10, 11]

Из всех средств механизации, задействованных в перевозках контейнеров с опасными грузами, наиболее «узким местом» является комплектование грузов в контейнер на ПКС-5, поэтому необходимо предусмотреть еще одно место по комплектованию опасных грузов в контейнер на ПКС-5. Потребное количество мостовых кранов МК-15 будет равно 1 единице. Потребное количество подъемно-комплектовочных столов ПКС-5 составит 2 единицы.

Основным средством при перевозке контейнеров являются контейнеровоз АК-6, которыми осуществляется подвоз контейнеров к воздушным судам для загрузки их на борт воздушного судна и от воздушного судна к грузовому двору.

Потребное количество АК-6 будет равно 6 единицам. Таким образом, необходимо дополнительно приобрести 3 единицы АК-6 или вместо них также можно использовать и автомобили с подъемным кузовом АПК-10.

Расчет необходимой площади складских помещений и расчет потребности в средствах

Произведенные в работе расчеты показали, что для размещения опасных грузов в транспортных пакетах должна быть выделена площадь для напольных паллет –176,8 м^2 и под незапакетированные мешки на стеллажах площадь 860 м^2. Общая площадь составит 1037 м^2, что занимает 42% площади склада временного хранения 2481,00 м^2. С целью уменьшения занимаемых площадей до необходимого рекомендуемого сегмента площади, обычно выделяемой для опасных грузов в 22–25% предлагается паллеты размещать в 3 яруса, используя ограждающие сетки для поддонов ОС-02-EURO и ОС-02-FIN. При необходимости можно организовать склад-площадку под оборудованным навесом вне складской территории.

Для переработки заданного грузооборота аэропорта необходимая численность автомобилей с подъемным кузовом составляет 4 единиц, погрузчиков 1 единицы.

Расчет стоимости и сроков перевозки груза для железнодорожного транспорта

Необходимо перевезти железной дорогой максимальное количество – 32% от всей месячной поставки каустической соды (1690 т), которое невозможно отправить воздушным транспортом из аэропорта Пулково по показателям нелетной погоды в январе, т. е. 540 т едкого натра. Перевозку каустической соды из Санкт-Петербурга в Оулу можно осуществить 2 основными направлениями (рис. 8).

№ 1. Санкт-Петербург – Бусловская – Вайникала – Коувола – Куопио – Контиомяки – Оулу, 874 км.

№1, а. Карельский перешеек: Санкт-Петербург – Бусловская: железные дороги РФ (RZD), 151 км.

№1, б. Центральная Финляндия: Вайникала – Коувола – Куопио – Контиомяки – Оулу: железные дороги Финляндии (VR), 723 км.

№ 2. Санкт-Петербург – Хийтола – Суоярви – Костомукша – Кивиярви – Вартиус-Контиомяки – Оулу, 1032 км.

№ 2, а. Республика Карелия: Санкт-Петербург – Хийтола – Суоярви – Костомукша – Кивиярви, 771 км;

№ 2, б. Центральная Финляндия: Вартиус – Контиомяки – Оулу; железные дороги Финляндии (VR), 261 км.

Для определения более рационального маршрута перевозки требуется провести сравнительный анализ провозных платежей и времени перевозки. Подвижной состав крытый цельнометаллический вагон модели 11-217 [12]. Общее количество вагонов составит 9 единиц. Маршрутная скорость 600 км/сут. Расчет производится по схемам: железные дороги России по Прейскуранту 10-01[13]; железные дороги Финляндии по Международному транзитному тарифу (МТТ) [14].

Общая провозная плата, определенная по тарифам, составит составит: маршрут № 1 – 4919687,2 руб.; маршрут № 2 – 7149651,3 руб.

Определение времени доставки груза производится по формуле:

$$T_{\text{дост. 1}} = L/V + t_1 + t_2 + t_3 \qquad (12)$$

где L – протяженность маршрута перевозки, 2146 км; V – скорость перевозки по железным дорогам обеих администраций, т. е. РФ и Финляндии, 600 км/сут; t_1 – время на погрузку груза на же-

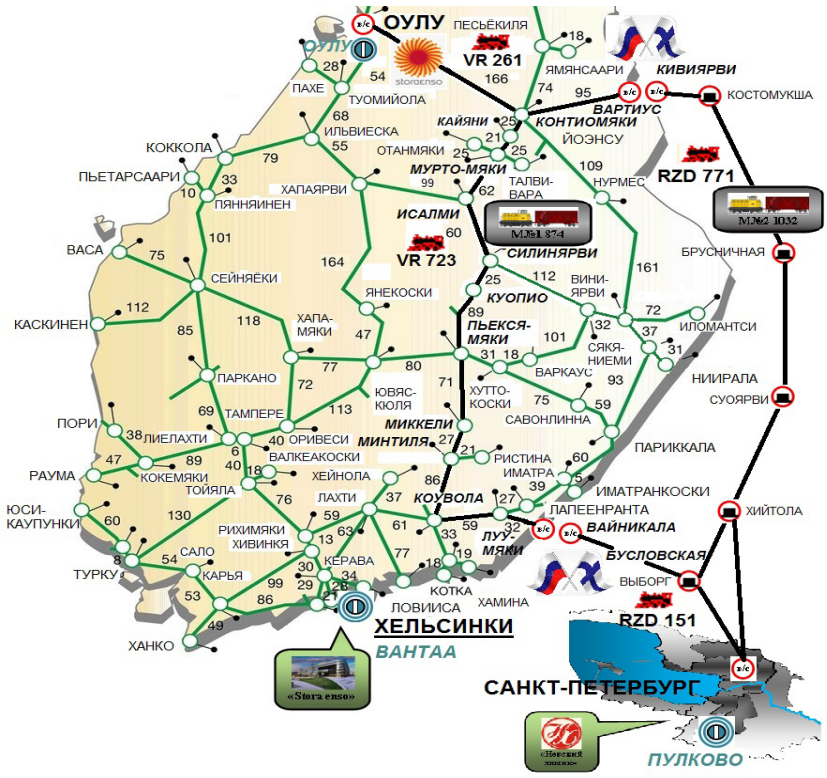


Рис. 8. Схема маршрута перевозки груза по железным дорогам

лезнодорожной станции Санкт-Петербург – 6 часов для отправки крытых вагонов, т. е. 0,25 сут.; t_2 – время на выгрузку груза на железнодорожной станции Оулу– 4 часа для отправки крытых вагонов, т. е. 0,17 сут.; t_3 – время на таможенный осмотр, перепломбирование и переоформление накладной на пограничных железнодорожных станциях Вайникала и Вартиус – 2 ч, т. е. 0,09 сут.

Время доставки груза определенная по формуле (12) составит по маршруту № 1–2 сут.; по маршруту 32–2 сут. 6 часов.

Анализ финансовых и временных показателей реализации транспортных маршрутов показывает очевидную выгоду использования маршрута № 1: по стоимостным показателям дешевле на 2 229 964,1 руб. или на 31,2%; по срокам перевозки быстрее на 6 часов или на 11,3%.

Анализ показателей дней нелетной погоды по месяцам в аэропорту Пулково показывает, что наибольший пик приходится на январь – 32%, естественно на этот месяц приходится наибольшая нагрузка на замещающие воздушный транспорт железнодорожные перевозки. Она составляет 9 вагонов. Следующим по этому показателю является февраль – 24,6%, с месячной поставкой в 7 вагонов. В марте, августе, ноябре и декабре показатель нелетных дней составляет в пределах 21% и требует месячных перевозок в объеме 6 вагонов. В апреле, июле, сентябре и октябре средний показатель непогоды составляет 17,8%. В эти месяцы потребное число вагонов составит 5 единиц. В мае потребное число вагонов составит 4 единицы. Минимальное число вагонов, согласно сказанному выше, составляет 3 вагона.

Несмотря, на то, что среднее число вагонов в месяц относительно невелико, с целью недопущения срыва перевозок ввиду внезапного отсутствия порожнего подвижного состава имеет смысл арендовать часть потребного месячного парка подвижного состава. Наиболее рациональным представляется брать на постоянную аренду 3 крытых вагона модели 11-217.

Средняя стоимость аренды крытого вагона на разовую поездку составляет 1600 руб./шт. Исходя из предположения, что в среднем продолжительность одной ездки вагона с учетом времени на погрузочно-разгрузочные работы составляет 3 суток, тогда среднее число ездок составит 10 ед. Следовательно, общая сумма аренды 3 вагонов на месяц составит 48 000 руб. Итак, необходимо посчитать экономическую эффективность осуществления перевозок в арендованных вагонах при максимальном и минимальном объеме перевозок.

Анализ расчетов показывает, что даже разовая перевозка арендованных 3 вагонов эконо-

мит средств больше в 5,28 раза, чем стоимость месячной аренды этих вагонов и максимальная трехкратная перевозка больше стоимости аренды в 15,35 раза.

Таким образом, имеет смысл брать на постоянной круглогодичной основе 3 вагона в аренду. Брать большее число вагонов в аренду не имеет смысла, так как эти же вагоны можно использовать на нужное число ездок без риска срыва объема перевозок.

Заключение

В настоящее время в нашей стране развитие перевозок опасных грузов не достигло своего максимума, поэтому тема настоящей статьи актуальна и посвящена разработке предложений по организации непрерывной поставки едкого натра из Санкт-Петербурга в Оулу (Финляндия).

Для достижения поставленной цели в статье последовательно рассматривались следующие вопросы:

– определены тара, количество транспортных пакетов и контейнеров, технология и объемы перевозки едкого натра от грузоотправителя ООО НПФ «Невский химик» в адрес целлюлозно-бумажного комбината Stora Enso Oyj;

– осуществлен выбор грузовых судов на реально существующей воздушной трассе Санкт-Петербург – Хельсинки и подвижного состава на железнодорожном транспорте;

– произведен анализ дней нелетной погоды по месяцам в аэропортах Пулково и Вантаа и определено количество груза, которое необходимо доставить получателю в этот период железнодорожным транспортом, в качестве альтернативного перевозчика;

– расчетами обоснованы размеры контейнерной площадки, площади склада, их превышение и потребные средства перонной механизации при возникновении нелетной погоды в аэропорту Пулково;

– определены два маршрута перевозки на железнодорожном транспорте и на основе анализа их стоимостных и временных характеристик обоснован наиболее рациональный из них;

– расчетом установлено оптимальное количество вагонов, которое целесообразно брать в годовую аренду для перевозки части груза в период нелетной погоды на исследуемой воздушной трассе.

Реализация разработанных предложений позволит обеспечить бесперебойную доставку едкого натра из Санкт-Петербурга в Оулу круглогодично в объеме суточных потребностей производства, минуя возможные задержки ввиду нелетной погоды.

Библиографический список

1. АО Грузовой терминал Пулково. URL: https://pulkovo-cargo.ru/company/about (дата обращения: 10.09.2022).

2. Гидроксид натрия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Гидроксид_натрия (дата обращения: 10.09.2022).

3. Stora Enso. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Stora_Enso#Деятельность (дата обращения: 11.09.2022).

4. Аэропорт Хельсинки-Вантаа. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Хельсинки-Вантаа (дата обращения: 29.09.2022).

5. Аэропорт Оулу. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Оулу_(аэропорт) (дата обращения: 29.10.2022).

6. ООО «НПФ Невский химик». URL: http://www.nevhimik.ru/(дата обращения: 10.09.2022).

7. Атлас гидрометеорологических данных. Т. 2. Европа. Ч. 1. М.: Воениздат, 1991. 440 с.

8. *Белгородский С. Л., Музалев А. А.* [и др.] Единая методика определения минимумов аэродромов для взлета и посадки воздушных судов. М.: Воениздат, 1994. 196 с.

9. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам (утв. Советом железнодорожного транспорта СНГ, протокол от 05.04.1996 N 15, ред. от 16.10.2022) // Консультант плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97657/ (дата обращения: 03.11.2022).

10. *Крючков Л. А.* Грузовые перевозки на воздушном транспорте СССР (Организация, технология, экономика). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 232 с.

11. Перевозка грузов воздушным транспортом: учеб. пособие / Е. В. Базаева; Авиационная школа Аэрофлота. М.: Авиационная школа Аэрофлота, 2014. 360 с.

12. Вагон.by: сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. Текстовые дан. и фот. URL: http://ru.wikipedia.org/ (дата обращения: 19.03.2021).

13. Об утверждении Прейскуранта № 10-01 «Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами» (Тарифное руководство № 1, части 1 и 2) (с изменениями на 15 ноября 2018 года). Тарифное руководство от 17 июня 2003 года № 1. Постановление ФСТ России от 17 июня 2003 года №47-т/5 // Кодекс. Электронный фонд нормативной и правовой информации. URL: http://docs.cntd.ru/document/901868848 (дата обращения: 19.03.2021).

14. Международный железнодорожный транзитный тариф. МТТ., Комитет ОСЖД, г. Варшава. 2001 (с изменениями и дополнениями на 01.01.2009 г.) 110 с.

УДК 658.7

В. А. Беляков*
магистрант
Э. А. Пиль*
доктор технических наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКОЙ КОМПАНИИ

В статье представлен анализ работы транспортно-экспедиторской компании, а именно описано поставкой какой продукции занимается данная компания, представлены маршруты следования; изучена возможность замены обычного грузового транспорта на беспилотный; сделана таблица сравнения беспилотного грузового автомобиля и обычного, выбран наиболее подходящий вариант для данной компании.
Ключевые слова: *беспилотные автомобили, грузовой транспорт, маршрут, транспортно-экспедиторская компания.*

V. A. Belyakov*
Postgraduate Student
E. A. Pil*
Dr. Sc., Tech., Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF UNMANNED VEHICLES IN ST. PETERSBURG BASED ON THE ANALYSIS OF A FREIGHT FORWARDING COMPANY

In the article presented an analysis of the freight forwarding company, namely, described the delivery of what products is engaged in this company, presented routes; explored the possibility of replacing the usual truck on the transport on a pilot; made a table comparing the unmanned truck and conventional, selected the most suitable option for the company.
Keywords: *Unmanned cars, freight transport, route, freight forwarding company.*

Введение

Современные технологии ведут человечество к неизбежной череде изменений: инновационные технологии позволяют нам использовать спутниковый Интернет, внедрение криптовалюты в экономическую среду позволяет децентрализовать майнинговые ресурсы. Список изменений, происходящих в настоящее время, можно продолжать очень долго, однако в данной статье мы затронем один из важнейших, на мой взгляд, аспект.

Ученые всего мира начинают уделять большее внимание внедрению беспилотного транспорта в нашу жизнь. Данный комплекс мероприятий рассчитан на продолжительный период, поскольку эта отрасль только начинает развиваться и тестироваться в современном мире.

Беспилотный автомобиль – транспортное средство, способное передвигаться самостоятельно по установленному алгоритму движения или под дистанционным контролем управляющего специалиста без водительского вмешательства.

Преимуществами применения технологии беспилотного режима являются:

1. Полное исключение человеческого фактора, способного оказать негативное влияние на окружающий транспортный поток – пониженная реакция водителя из-за сонного состояния или принятия веществ, оказывающих влияние на сознание, могут привести к возникновению ДТП, повлекшему повреждение других ТС или нанесение увечий людям;

2. Минимизация экономических издержек на содержание ТС путем оптимизации расхода энергии за счет структурированного алгоритма движения;

3. В перспективе, при расширении проезжей части и внедрении специальной полосы для

грузового транспорта, беспилотная система передвижения позволит использовать бесперебойный транспортный поток, значительно снижающий время доставки грузов.

Недостатки:

1. Относительная дороговизна перехода из-за высокой стоимости технологии и, как следствие, высокой стоимости ТС, имеющего беспилотный режим;

2. Недостаточная квалификация сотрудника, составляющего алгоритм движения, может привести к сбою движения транспортного потока, ДТП и поломке ТС организации;

3. Внедрение беспилотного режима создаст массовое сокращение кадров водителей, что повлечет увеличение уровня безработицы [1].

Анализ работы транспортно-экспедиторской компании

ООО «ТЭК ТРАНСГРУПП» зарегистрирован 20.03.2000, юридический адрес: 198035, город Санкт-Петербург, ул. Межевой Канал, д. 5 литера АХ, помещ. 26-н (ч.п. 19-20, 24-25, 28-29, 34-39).

ООО «ТЭК ТРАНСГРУПП» является транспортно-экспедиционным предприятием, осуществляющим грузоперевозки по всей России. Основным видом деятельности является деятельность автомобильного грузового транспорта (Компания организует перевозки грузов разного типа (негабаритные грузы, имеющие нестандартные размеры и габариты, опасные грузы, скоропортящаяся продукция, требующая соблюдения специального температурного режима и пр.) на любые расстояния. Компания ООО «ТЭК ТРАНСГРУПП» дополнительно предоставляет своим клиентам услуги по страхованию грузов. Компания использует возможности собственного автопарка, а также привлеченный транспорт, принадлежащий другим транспортным компаниям.

В подвижной состав компании входит автомобильная техника грузоподъемностью от 500 кг до 90 т и объемом полуприцепов от 5 до 120 $м^3$ (такие машины как ГАЗели, длинномерные полуприцепы, фуры, автопоезда, рефрижераторы и платформы для негабаритных грузов).

Внедрение беспилотного грузового транспорта на один из маршрутов компании

Теперь рассмотрим один из наиболее частых маршрутов данной компании. Одним из наиболее частых и востребованных маршрутов является маршрут от складского комплекса «Армада Парк Север» (Выборгское ш., 503, корп. 3, стр. 1) до автомобильного завода Hyundai Motor Manufacturing Rus (Левашовское ш., 20), основным грузом для доставки на данном маршруте являются запчасти для автомобилей. Варианты маршрутов доставки представлены на рис. 1 и 2.

Давайте рассмотрим возможность внедрения на данном маршруте (маршрут № 2) грузовых беспилотных автомобилей, которые будут курсировать только в ночное время в связи с тем, что в дневное время дорога достаточно загружена. Существует множество моделей и видов беспилотных грузовых автотранспортных средств, например, КамАЗ-3373 «Челнок», Tesla Semi, Volvo Vera, Volvo Fmx и др. [2].

Изучив и сравнив их характеристики, я пришел к выводу, что целесообразно использовать Tesla Semi. В табл. 1 представлены характеристики беспилотного грузового автомобиля Tesla Semi.

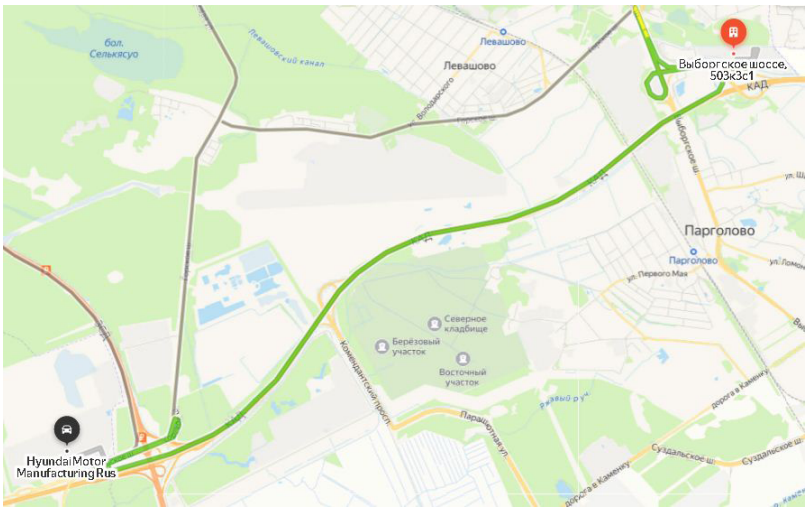


Рис. 1. Первый вариант маршрута (расстояние 16,5 км)

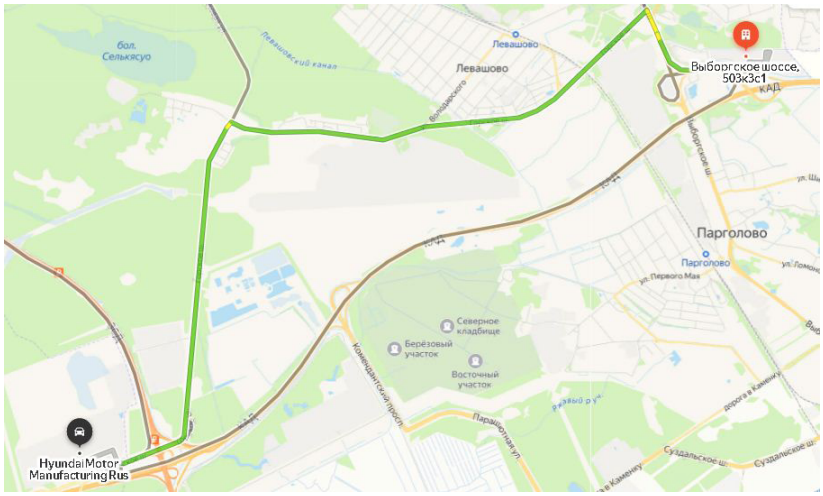


Рис. 2. Второй вариант маршрута (расстояние 13 км)

Таблица 1

Характеристики Tesla Semi

Модель	Запас хода, км	Стоимость, $	Грузоподъемность, т	Время зарядки, ч
Tesla Semi	800	180000 (за модель с запасом хода 800 км) 150000 (за модель с запасом хода 500 км)	до 36	0,67

Целесообразность внедрения и применения грузового беспилотного автомобиля

В табл. 2 представлено сравнение показателей беспилотного автомобиля Tesla Semi и обычного грузового автомобиля.

Чтобы понять, что выгоднее, рассчитаем расходы, например, на 2 года. Для этого возьмем среднюю стоимость обычных грузовых автомобилей и стоимость беспилотного автомобиля с запасом хода 800 км. Также условимся, что необходимость в перевозке ежедневная. Среднюю величину пути примем за 15 км туда и 15 км обратно.

Таблица 2

Сравнение показателей беспилотного автомобиля и обычного

Показатели для сравнения	Tesla Semi	Аналогичные грузовые автомобили с обычным управлением
Цена автомобиля	10 992 600 руб. (за модель с запасом хода 800 км) 9 160 500 руб. (за модель с запасом хода 500 км)	Камаз 65116 (5 300 000 руб.) Man TGX (14 500 000 руб.) Маз 6430 (7 125 200 руб.) Средняя цена: 8 975 066 руб.
Затраты на топливо	Емкость аккумулятора 500 квт/ч Стоимость 1 квт/ч ≈ 4 руб. Итоговая стоимость = 2000 руб. За полную зарядку (запас хода 800 км)	Рассмотрим на примере Камаз 65116: объем бака 350 литров, расход топлива на 100 км ≈ 38 литров, средняя стоимость дизельного топлива 52,5 руб. Заправить полный бак стоит 18375 руб., топлива хватит ≈ 920 км
Затраты на З/П	з/п диспетчера (в части данного беспилотного средства) 5000 руб. в месяц*	Средняя з/п водителя 90 000 руб. в месяц

*В связи с тем, что на беспилотном транспорте отсутствует водитель, затрат на заработную плату водителя не требуется, но есть затраты на зарплату диспетчеру, который следит за машинами. Зарплата диспетчера, который одновременно следит за множеством беспилотных автотранспортных средств в расчете на один беспилотный автомобиль будет, соответственно, значительно меньше.

Таблица 3

Расходы

Статьи расходов	Tesla Semi	Аналогичные грузовые автомобили с обычным управлением
Цена автомобиля	10 996 200 руб.	8975066 руб.
Затраты на топливо	365 дней×30 км×2 = 21 900 км. Итоговая стоимость зарядки = 219 00 км× 2000 руб./800 км = 54 750 руб. за 2 года	365 дней×30 км×2 = 21 900 км. Итоговая стоимость топлива = 21900 км× 18375 руб./920 км = 437404 руб. за 2 года
Затраты на З/П	5000 руб.×24 месяца = 120 000 руб.	90000 руб.×24 месяца = 2 160 000 руб.
ИТОГО расходов за 2 года	11 167 350 руб.	11 572 470 руб.

В табл. 3 представлено сравнение статей расходов беспилотного автомобиля и обычного грузового автомобиля.

Взяв в расчет полученные данные можно сделать вывод, что уже через 2 года общие расходы с начала использования беспилотного автотранспорта будут меньше, чем обычного грузового автотранспорта. В дальнейшем с каждым годом это превышение будет только увеличиваться. Это обусловлено тем, что несмотря на первоначальные большие траты на покупку, в дальнейшем затраты на беспилотный автотранспорт значительно меньше, чем на обычный. Таким образом, можно сделать вывод, что использование беспилотного автотранспорта более эффективно, чем использование обычного грузового.

Библиографический список

1. *Юзаева А. Г. Кукарцев В. В.* Беспилотные автомобили: опасности и перспективы развития. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-avtomobili-opasnosti-i-perspektivy-razvitiya (дата обращения: 04.12.2022).

2. *Халяфиев А. А. Халяфиев Р. А.* Беспилотные грузовые автомобили. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-gruzovye-avtomobili (дата обращения: 04.12.2022).

УДК 656.087

С. А. Богданова*
студент
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ ЭВАКУАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В статье рассматриваются основные вопросы совершенствования методов эвакуации автомобилей. Рассмотрены основные нормативно-правовые акты, регламентирующие деятельность эвакуационных служб. Описывается влияние определенных факторов на итоговую стоимость эвакуации транспортных средств. Приводится краткое описание учебных программ дополнительного профессионального образования в рамках подготовки специалистов автомобильного ассистанса. Показана социально-экономическая эффективность предложенных мероприятий.
Ключевые слова: *эвакуатор, учебная программа, транспортная документация, штрафная площадка, транспортное средство, ассистанс.*

S. A. Bogdanova*
Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MEASURES TO IMPROVE THE METHODS OF EVACUATION OF VEHICLES

The article discusses the main issues of improving the methods of evacuation of cars. The main regulatory legal acts regulating the activities of evacuation services are considered. The influence of certain factors on the laying of the final cost during the evacuation of vehicles is described. A brief description of the training programs of additional professional education in the framework of the training of automotive assistant specialists is given. The socio-economic efficiency of the proposed measures is shown.
Keywords: *tow truck, curriculum, transport documentation, penalty area, transport vehicle, assistance.*

Введение

В случае нарушения правил остановки или стоянки транспортных средств на городских улицах, неисправности или повреждения автомобилей, если автовладелец не в состоянии перегнать автомобиль самостоятельно используется эвакуатор.

Услуги компаний по транспортировке автомобилей эвакуаторами и различных ассистанс компаний становятся все более актуальными. В санкционный период 2022 г. в связи с прекращением поставок и удорожанием оставшихся автомобилей и запчастей, количество поломок и вызовов эвакуаторов увеличивается.

Характеристика рынка эвакуационных услуг

На текущий момент по данным ассоциации европейского бизнеса (АЕВ), в марте 2022 г. было продано 55 129 машин, это показывает, что продажи автомобилей в РФ снизились на 62,9% по сравнению с тем же периодом прошлого года [1].

Выделим основных потребителей эвакуационных услуг:

1. Частные лица (B2C) – основная услуга для данных потребителей – это перемещение автомобиля при поломке на дороге или аварии. Также к услугам эвакуатора прибегают для транспортировки негабаритной строительной техники, снегоходов, квадроциклов, гаражей и т. д. Частные эвакуационные службы также предоставляют дополнительные услуги: «пьяный водитель», автоконсьерж и пр.

2. Коммерческие организации (B2B):

– автосервисы, которые не имеют собственного эвакуатора;

– страховые компании (в некоторых страховых случаях компаниям может потребоваться

транспортировка машины, в связи с этим, как правило, заключаются договора со службами эвакуации, так как значительно повышается оперативность выполнения услуг);

– автосалоны – сотрудничество со службами эвакуации позволяет оперативно доставлять новую технику со склада к точкам продаж или клиенту;

– муниципальные структуры – эвакуатор осуществляет перевозку неправильно припаркованных автомобилей на спецстоянку. Выбор коммерческих компаний по эвакуации транспортных средств определяется через тендерные процедуры.

Эвакуация неправильно припаркованного транспортного средства (ТС) чаще всего происходит в будние дни на перекрестках с пролеганием по ним трамвайных путей, при стоянке транспортных средств рядом с торговыми центрами, станциями метрополитена, офисами, музеями [2].

При эвакуации ТС водитель или собственник автомобиля обязан оплатить стоимость нахождения ТС на спецстоянке в случае, если было зарегистрировано нарушение ПДД, а также стоимость услуг эвакуатора. Итоговая стоимость при эвакуации ТС складывается из марки и модели ТС, чем больше масса транспортируемого ТС, тем дороже обойдутся услуги и понадобится более мощная техника.

Также стоимость эвакуации ТС влияют состояния рулевого управления, коробки передач и колес. Техническое состояние данных элементов эвакуируемого ТС влияет на способ погрузки неисправного ТС на платформу эвакуатора. Если колеса авто нормально вращаются и управляются, то эвакуация обойдется дешевле. При блокировке данных узлов необходим кран-манипулятор (рис. 1), который является самым дорогостоящим по сравнению с другими типами эвакуаторов.

При заблокированных/заклинивших дверях автомобиля отсутствует доступ к замку зажигания или рулевому колесу, поэтому ТС придется грузить на платформу с помощью крана-манипулятора, что делает услугу более дорогостоящей.

Срочность вызова также увеличивает стоимость эвакуационных услуг, так как это требует дополнительных усилий компании, которая предоставляет данную услугу.

Положение эвакуируемого ТС относительно других объектов и сложности подъезда к нему также влияет на итоговую стоимость. Например, если ТС «зажато» между двумя другими автомобилями, то погрузка значительно усложняется, это увеличивает конечную стоимость.

На итоговую стоимость могут повлиять и иные факторы, которые учитываются в индивидуальном порядке. Определение окончательной стоимости услуг можно уточнить у менеджера при вызове эвакуатора. Каждая служба имеет свои тарифы за оказание услуг, которые могут зависеть от времени суток, погодных условий, адреса нахождения и доставки автомобиля и пр.

Основные нормативно-правовые акты, регулирующие деятельность эвакуаторов

Федеральный закон от 10 дек. 1995 г. № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» устанавливает категории и входящие подкатегории ТС, которые определяются в том числе максимальной массой, количеством сидячих мест, максимальной массой с прицепом и пр. [3].

Рис. 1. Эвакуация автомобиля краном-манипулятором

Приказ МВД России № 185 от 02.03.2009 «Об утверждении Административного регламента Министерства внутренних дел Российской Федерации исполнения государственной функции по контролю и надзору за соблюдением участниками дорожного движения требований в области обеспечения безопасности дорожного движения» [4].

Статья 27.13 «Задержание транспортного средства» КоАП РФ указывает случаи и порядок задержания, порядок перемещения ТС на специализированную стоянку, порядок возврата ТС их владельцам или иным лицам, имеющим при себе документы, подтверждающие право управления данным ТС. Также в статье описана обязанность привлеченного лица к оплате стоимости перемещения и хранения, задержанного ТС [5].

Постановление Правительства РФ от 23.10.1993 № 1090 «О Правилах дорожного движения» в п.п. 2.1.1 и 2.1.1(1) части 12 указывает документы, которые должен иметь при себе водитель автомобиля. Также документ предписывает правила и порядок перемещения, задержанного ТС [6].

Уголовный кодекс РФ ФЗ от 18.12.2001 № 174-ФЗ и уголовный кодекс РФ ФЗ от 13.06.1996 № 63-ФЗ указывают, когда автомобиль может быть задержан в качестве вещественного доказательства [7], [8].

ФЗ от 02.10.2007 № 229-ФЗ ст.80 «Наложение ареста на имущество должника» предписывает перемещение ТС на специализированную стоянку, в случае наложения на него ареста с необходимостью изъятия у владельца [9].

Также различные постановления, приказы и распоряжения регионального уровня предписывают требования к фотофиксации внешнего вида задержанного ТС, сроках хранения снимков и условиях их предоставления, порядок и сроки оплаты стоимости перемещения и хранения задержанных ТС, устанавливают тарифы на перемещение и хранение задержанных ТС.

Приказ ФАС № 1145/16 от 15.08.2016 «Об утверждении Методических указаний по расчету тарифов на перемещение и хранение задержанных транспортных средств и установлению сроков оплаты: приказ Федеральной антимонопольной службы» утверждает методику расчета тарифов на перемещение и хранение задержанных ТС и устанавливает сроки оплаты. Тарифы определяются в расчете на 1 транспортное средство [10].

Для регулирования деятельности специализированных дорожных служб при уборке городских улиц нет нормативно-правовых актов, которые бы регулировали деятельность городских служб по поднятию и перемещению транспортных средств на время уборки [11].

Во избежание нарушений ПДД водителями ТС в местах, где это необходимо следует установить дополнительные дорожные знаки остановки и стоянки ТС.

Во избежание случаев мошенничества и угона ТС следует информировать водителей ТС о документах для проверки их у сотрудников служб эвакуации, а также о документах, которые следует оставлять у себя.

Основные направления совершенствования методов эвакуации пассажирского транспорта

При эвакуации автомобиля существуют определенные недостатки, которые ухудшают работу эвакуационных служб и создают негативное отношение водителей эвакуируемого транспортного средства по отношению к службам эвакуации.

В связи с существующими недостатками были выявлены основные направления совершенствования методов эвакуации пассажирского транспорта:

– избежание повреждений при погрузке, транспортировке и выгрузке ТС;

– недостаточная квалификация работников эвакуатора;

– необходимость водителя ТС делать фото и видеорегистрацию погрузки и выгрузки автомобиля;

– недостаток автопарка;

– недостаточность оснований (фотофиксация внешнего вида, либо двое понятых) для определения, что повреждения ТС произошли по вине сотрудников службы эвакуации;

– нет законодательного права поднимать ТС на время очистки улиц;

– неконтролируемое качество работы и состояния техники частных эвакуационных служб;

– возможные случаи угона или мошенничества при эвакуации;

– непунктуальность водителей эвакуаторов и изменение цены эвакуации при транспортировке (отсутствие четко сформированной тарифной сетки);

– противоречие дорожных знаков друг другу;

– незнание владельца ТС о документах, которые необходимо составлять с службами эвакуации и какие из них необходимо оставлять себе;

– необходимость сбора документов и уточнение деталей водителем ТС при возмещении сто-

имости со стороны страховщика, если работа эвакуатора укладывается в понятие «страховой случай».

Также существует необходимость в дублировании дорожных знаков, так как чаще всего они устанавливаются только в начале улицы. Стоит отметить, что противоречие знакам или разметке в зоне платных парковок является проблемой, по которой владелец транспортного средства нарушает ПДД. Также эти нарушения могут происходит и по инициативе самого автовладельца, что чаще всего и является причиной эвакуации ТС. Также на работу сотрудников служб эвакуации влияет качественная работа диспетчерского аппарата эвакуационных служб с клиентом.

Организация обучения персонала эвакуационых служб и ассистанс-компаний

Эвакуация ТС предполагает от сотрудников служб эвакуации постоянное получение новых теоретических знаний, так как появляется новая сложная техника и совершенствуется дополнительное оборудование. Кандидаты должны быть готовы к получению теоретических знаний и научиться управлять всеми моделями эвакуаторов. Данная работа также требует выносливости, так как заказы поступают круглосуточно. Иногда требуется способность самостоятельно принимать решения, когда возникшая ситуация с ТС является не совсем стандартной.

Тем не менее, в настоящее время в существующих государственных и частных Ассистенс компаниях и фирмах, а также индивидуальных провайдерах, привлекаемых только для эвакуации транспортных средств, не существует единой методики обучения и учебных программ подготовки собственного персонала. В сущности, программы подготовки сотрудников сводятся к изучению технических характеристик эксплуатируемых марок автоэвакуаторов, современных версий ПДД и существующей законодательной базы региона эксплуатанта по данным вопросам.

Данная ситуация, наряду с нестыковкой транспортных документов технического, социального и административного содержания в различных звеньях управления федерального, регионального и муниципального уровней регулирования дорожного движения нередко приводит к серьезным разночтениям в толковании тех или иных дорожных ситуаций с точки зрения законодательной базы. Это обстоятельство до сих пор приводит к многочисленным инсинуациям, возникающим в судах и органах ГИБДД между представителями администраций, службой Ассистанс и эвакуации и владельцами транспортных средств.

В этой связи представляется достаточно актуальной разработка единых рекомендованных адаптированных учебных программ начального обучения в рамках подготовки специалистов автомобильного Ассистанса по направлению 23.03.01 – Технология транспортных процессов.

Программы должны отвечать современным требованиям к обучению и практическому овладению организационными и коммуникативными навыками.

Структурно, они включают в себя:

– описание сферы применения,

– общие данные о программе,

– перечень формируемых знаний, умений, навыков, компетенций,

– учебный план,

– учебно-тематический план,

– список используемых источников,

– описание применяемых методов обучения,

– систему контроля и оценки знаний, умений, навыков, компетенций.

Темы программы «Инженер-техник аварийно-спасательной службы»:

1. Основы организации и проведения аварийно-спасательных работ.

2. Работы по техническому обслуживанию и ремонту техники, приемку, технического обслуживания и ремонта автотранспорта.

3. Стандартные и сертификационные испытания объектов техники. Контроль соответствия технических характеристик отремонтированных автотранспортных средств и систем требованиям технической документации.

4. Дефекты работы автотранспорта и систем их устранения, оформление дефектных ведомостей, экологическая безопасность при эксплуатации автотранспортных средств.

5. Методологический анализ и выявление наиболее критических шагов, производственных процессов с целью управления качества продукции, качества деталей, агрегатов автомашин.

6. Основы эксплуатации машин, технологии сервисных работ, основные методы и виды технической помощи, эвакуации, диагностики неисправностей, виды и методы диагностики, техники безопасности при проведении работ, производственно-технической инфраструктуры сервиса, экономики и организации систем сервиса.

7. Международные стандарты качества автопроизводителя, передовые методы автоматизированного контроля качества машиностроительной продукции.

8. Методы испытаний машин и современного испытательного оборудования.

9. Передовые технологии производства и ремонта отечественной и зарубежной техники.

Темы программы «Логистика аварийно-спасательной службы»:

1. Транспортное обслуживание в структуре транспортных процессов.

2. Функциональный цикл логистики автомобильного ассистанса.

3. Логистика услуг дорожного ассистанса на различных видах транспорта.

4. Информационная логистика услуг дорожного ассистанса.

5. Особенности обеспечения логистической деятельности компании ассистанс в экстремальных ситуациях.

6. Совершенствование аварийно- спасательной службы компании ассистанс на базе концепции логистики.

Темы программы «Управление. Автомобильный ассистанс»:

1. Основы логистики услуг автомобильного ассистанса.

2. Транспортное обслуживание в структуре транспортных процессов.

3. Функциональный цикл логистики автомобильного ассистанса.

4. Логистика услуг дорожного ассистанса на различных видах транспорта.

5. Информационная логистика услуг дорожного ассистанса.

6. Особенности обеспечения логистической деятельности компании ассистанс в экстремальных ситуациях.

7. Совершенствование аварийно- спасательной службы компании ассистанс на базе концепции логистики.

Перечень тем обусловлен необходимостью ознакомления сотрудников компаний ассистанс с общими основами функционирования данных сфер хозяйствования и формирования важных общепрофессиональных компетенций.

Социально-экономическая эффективность предложенных мероприятий

Специализированные обучающие программы дополнительного профессионального образования по направлению «Автомобильный ассистанс» по функционалам «Инженер-техник аварийно-спасательной службы», «Управление «Автомобильный ассистанс», «Логистика аварийно-спасательной службы» сформируют компетенции сотрудников служб в сфере ассистанс для совершенствования методов эвакуации пассажирского транспорта. Разработанные предложения позволят:

1) повысить уровень квалификации сотрудников эвакуационных служб и диспетчерского аппарата с помощью разработанных специализированных обучающих программ дополнительного образования;

2) создать нормативно-правовые документы для упорядочивания действий сотрудников специализированных дорожных предприятий по поднятию и перемещению транспортных средств;

3) установить верную и дополнительную разметки в зоне платных парковок, продублировать дорожные знаки в местах, где это необходимо;

4) контролировать автопарка и качество выполнения эвакуационных работ и технической помощи частных служб;

5) информировать водителей транспортных средств о необходимых документах для проверки их у сотрудников эвакуационных служб и документах, которые необходимо оставлять водителю ТС.

Данные предложения имеют логическую обоснованность и социально-экономическую эффективность. Социальная эффективность мероприятий будет проявляться: в снижении текучести кадров (удержание ключевых специалистов, снижение издержек на обучение и поиск новых сотрудников и т. д.); повышении мотивации сотрудников (следовательно, более качественное выполнение работ, эффективное взаимодействие персонала и пр.); улучшение социально-психологического микроклимата в коллективе; улучшение имиджа компании, как работодателя, так и партнера (привлечение новых клиентов, найм лучших специалистов). Обученный и квалифицированный персонал поспособствует увеличению размера тарифов и объема выполненных работ, произойдет приток новых клиентов. Внедрение правовых норм позволит урегулировать экономические отношения между специализированными дорожными предприятиями и водителями ТС.

Заключение

В статье представлены основные нормативно-правовые акты, регулирующие деятельность эвакуационных служб. Было выявлено, что отсутствуют документы, регламентирующие право подъема и перемещения ТС на время уборки городских улиц.

Основным направлением для совершенствования рынка эвакуационных услуг является

повышение уровня квалификации сотрудников служб эвакуации и ассистанс-компаний с помощью специализированных обучающих программ дополнительного профессионального образования по направлению «Автомобильный ассистанс» по функционалам «Инженер-техник аварийно-спасательной службы», «Управление «Автомобильный ассистанс», «Логистика аварийно-спасательной службы».

Спрогнозирована социально-экономическая эффективность, предложенных мероприятий.

Проанализировав рынок эвакуационных услуг, можно сделать вывод о том, что спрос на ассистанс транспортных средств будет только расти.

Библиографический список

1. Федеральная служба государственной статистики. Число собственных легковых автомобилей по субъектам Российской Федерации. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/DDFfgtCb/t3-4.xls (дата обращения: 11.11.2022).

2. Фонтанка.ру. Самые «эвакуаторные» места выдали «разговорчики». URL: https://www.fontanka.ru/2016/09/21/928?recordId=2016%2F09%2F21%2F928&regionId=478 (дата обращения: 11.11.2022).

3. О безопасности дорожного движения: Федер. закон от 10 дек. 1995 г. № 196-ФЗ: принят Гос. Думой 15 нояб. 1995 г.: [ред. от 10 дек. 2021 г.] // Собрание законодательства Российской Федерации. 1995. Ст. 25.

4. Об утверждении Административного регламента Министерства внутренних дел Российской Федерации исполнения государственной функции по контролю и надзору за соблюдением участниками дорожного движения требований в области обеспечения безопасности дорожного движения: приказ МВД России № 185 от 02 марта 2009 г.: принят МВД России 18.06.2009 г. // Минюст России. 2009. № 14112. Ст. 146.

5. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях: Федер. закон от 30 дек. 2001 г. № 195-ФЗ: принят Гос. Думой 20 дек. 2001 г.: одобрен Советом Федерации 26 дек. 2001 г.: [ред. от 1 июля 2021 г.] // Собрание законодательства Российской Федерации. 2002. №1. Ст. 27.13.

6. О Правилах дорожного движения: постановление Правительства Рос. Федерации от 23.10.1993 № 1090: [ред. от 31.12.2020] // Собрание законодательства Российской Федерации. 1993. Ст.12.

7. Уголовный кодекс Российской Федерации: Федер. закон от 18 декабря 2001 г. № 174-ФЗ: принят Гос. Думой 22 нояб. 2001 г.: одобрен Советом Федерации 5 дек. 2001 г.: [ред. от 25 марта 2022 г.] // Официальный интернет-портал правовой информации: гос. система правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102073942 (дата обращения: 11.11.2022).

8. Уголовный кодекс Российской Федерации: Федер. закон от 13 июня 1996 г. № 63-ФЗ: принят Гос. Думой 24 мая 1996 г.: одобрен Советом Федерации 5 июня 1996 г.: [ред. от 25 марта 2022 г.] // Официальный интернет-портал правовой информации: гос. система правовой информации. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102041891 (дата обращения: 14.11.2022).

9. Об исполнительном производстве: Федер. закон от 02 окт. 2007 г. № 229-ФЗ: принят Гос. Думой 14 сент. 2007 г.: одобрен Советом Федерации 19 сент. 2007 г.: [ред. от 30.12.2021 г.] // Собрание законодательства Российской Федерации. 2007. № 7-П. Ст. 80.

10. Об утверждении Методических указаний по расчету тарифов на перемещение и хранение задержанных транспортных средств и установлению сроков оплаты: приказ Федеральной антимонопольной службы № 1145/16 от 15 авг. 2016 г.: зарегистрирован в Минюст России № 43423 от 26 авг. 2016 г. // Официальный интернет-портал правовой информации: гос. система правовой информации. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201608290004 (дата обращения: 15.11.2022).

11. Адвокатское бюро «Антонов и партнеры». Изъятие автомобиля на специализированную стоянку (эвакуация на штрафстоянку). URL: https://pravo163.ru/izyatie-avtomobilya-na-specializirovannuyu-stoyanku-evakuaciya-na-shtrafstoyanku/ (дата обращения: 16.11.2022).

УДК 656.025.2

Д. Д. Варкентин*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗВИТИЕ МЕТРОПОЛИТЕНА В КРАСНОСЕЛЬСКОМ РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Статья посвящена анализу транспортной ситуации в Красносельском районе. Проанализированы основные проблемы, влияющие на работу общественного транспорта. Детально рассматриваются перспективные планы по развитию общественного транспорта в Красносельском районе. Составлены прогнозные оценки изменений транспортной ситуации после их внедрения в существующую схему района.
Ключевые слова: *метро, автобус, график следования, затрудненное движение, зоны жилой застройки, транзит, поток, маршрут.*

D. D. Varkentin*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentatio*

METRO DEVELOPMENT IN KRASNOSELSKY DISTRICT OF ST. PETERSBURG

The article is devoted to the analysis of the transport situation in the Krasnoselsky district. Prospective plans for the development of public transport in Krasnoselsky district are considered in detail, the main problems affecting the operation of public transport are analyzed. The paper analyzes the immediate plans for the introduction of new transport infrastructure facilities in the Krasnoselsky district, makes forecast estimates of changes in the transport situation after their introduction into the existing scheme of the district.
Keywords: *metro, bus, timetable, obstructed traffic, residential areas, transit, flow, route.*

Введение

Одним из важнейших структурных элементов современного крупного города, без которого невозможно его нормальное существование, является транспортная система. Функционирование городского пассажирского транспорта в таких городах во многом определяет удобство жизни городского населения. Среди широкого круга вопросов, обусловленных развитием и функционированием городов, транспортные задачи занимают достаточно важное место. Качественное выполнение городским пассажирским транспортом своей задачи является необходимым условием для воспроизводства рабочей силы, влияет на рост производительности общественного труда, способствует росту культурного уровня населения. Факторы, обусловливающие и характеризующие развитие транспорта в крупных городах, рост численности городского населения и потребности в пассажирских перевозках, увеличение городской территории и требование постоянного увеличения скорости сообщения и комфортабельности поездок [1].

На сегодняшний день проблематика исследования пассажирского транспорта набирает популярность. В последние годы во всем мире наблюдается переход населения из небольших населенных пунктов в современные города. Увеличение плотности населения заставляет задуматься о развитии пассажирского транспорта, с целью улучшения экологии и уменьшения плотности транспортного потока на дорогах.

Несмотря на огромный рост урбанизации, огромный спрос на инфраструктуру и несоответствие между спросом и предложением транспортной инфраструктуры вызывает потери топлива, загрязнение окружающей среды и несчастные случаи, а также потерю продуктивного времени и энергии. Во всем мире система об-

щественного транспорта играет важную роль в удовлетворении транспортного спроса городов. Признание экономически эффективного характера и гибкости, которые обеспечивает система пассажирского транспорта, привело к реформам, которые направлены на повышение производительности городов [2].

На данный момент развитие и популяризация общественного транспорта, являются основным инструментом минимизирующим транспортную загруженность в регионах с высокой плотностью населения, к которым также относится Красносельский район г. Санкт-Петербурга.

Анализ текущей транспортной ситуации

На данный момент основной проблемой Красносельского района является высокая транспортная загруженность. Это объясняется несколькими факторами:

1. Географическим положением Красносельского района. Район расположен на окраине города Санкт-Петербурга. Через Красносельский район лежит самый короткий путь для следования общественного транспорта, грузовых и легковых автомобилей из Петродворцового района города Санкт-Петербурга и Ломоносовского района Ленинградской области в центр города и промышленные зоны. При этом из-за обширной промышленной зоны дороги, ведущие в город сильно ограничены, к тому же можно добавить, что в районе на данный момент нет ни одной станции метро, а дороги до ближайших станций, расположенных в Кировском районе в час пик сильно загружены.

Рис. 1. Затрудненное движение на проспекте Маршала Жукова

На рис. 1 показан проспект Маршала Жукова, расположенный в Красносельском районе, который является основным и кратчайшим направлением из района в город. Такая ситуация является ежедневной на данном участке. Наибольшая загруженность наблюдается на участке до ближайших станций метро Автово и Кировский завод.

2. В последние годы во многих муниципальных округах района ведется обширная застройка, что усугубляет тяжелую ситуацию на дорогах.

На рис. 2 показан график заселения Южно-Приморского муниципального округа Красносельского района, из которого видно, что за последние 10 лет населения округа увеличилось более чем в полтора раза. При этом дорожная сеть, которая уже давно плохо справлялась с возложенной на нее нагрузкой фактически не изменилась. Бурный рост наблюдался в период с 2017 по 2020 гг., после небольшой стагнации в 2021 г. рост вновь возобновился.

Также можно отметить, что население муниципального округа Горелово и Красного Села за последние 10 лет также значительно возросло. Если в Южно-Приморском муниципальном округе планируется в 2030 г. открыть три станции метро, то в этих районах строительство станции метро не планируется в ближайшие годы. Несмотря на это ведутся дальнейшие планы по застройке данных округов.

3. Недостаточное покрытие и несоблюдение интервалов времени между рейсами наземного общественного транспорта.

Переполненные автобусы, которые следуют не по расписанию мало привлекательны для населения. Это способствует тому, что большая часть населения выбирает личный транспорт, что так же усугубляет транспортную ситуацию.

Также проблемой для общественного транспорта является высокая степень загруженности дорог, из-за чего общественный транспорт не может обеспечивать пассажирам движения строго по расписанию. Кроме того, на некоторых участках, движение на дорогах настолько затруднено, что перевозчику банально сложно обеспечить маршрут транспортными средствами, ведь время следования автобуса по маршруту может увеличиться в 3-4 раза за сутки. В Красносельском районе к такому участку можно отнести проспект Маршала Жукова, также в утреннее и вечернее время движение затруднено на Красносельском и Петергофском шоссе, которые являются основными транспортными магистралями района и пунктами транзита населения из областей в центр.

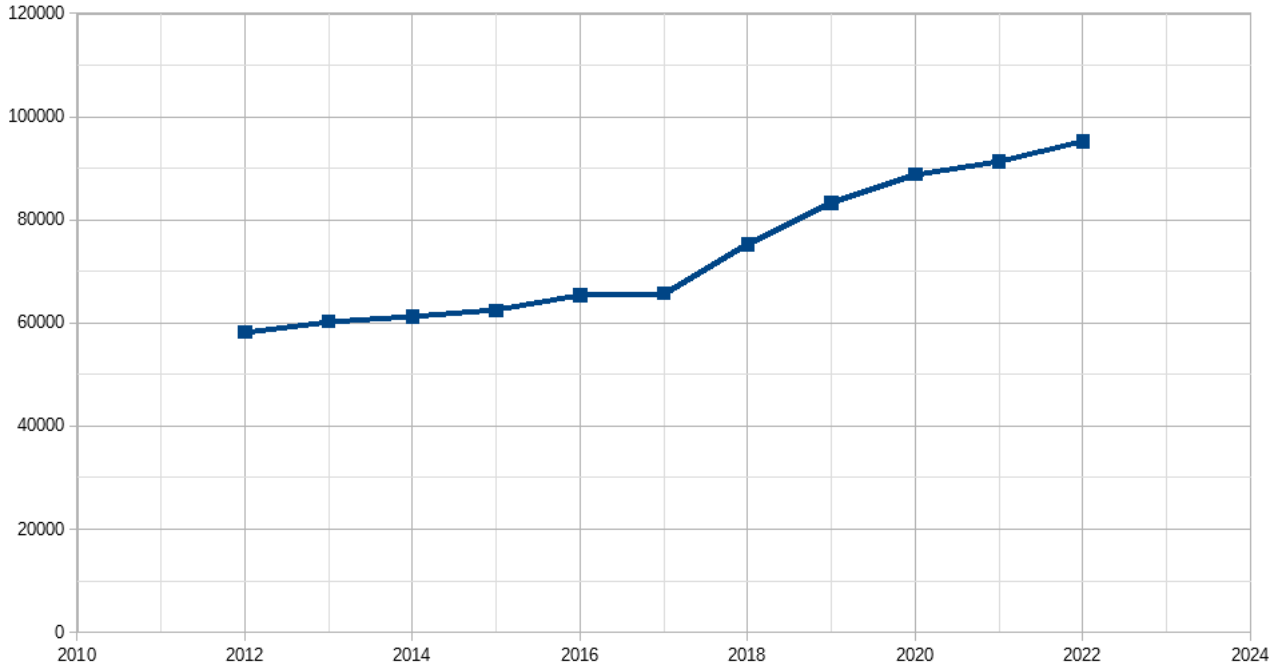


Рис. 2. График численности населения Южно-Приморского муниципального округа [3]

Развитие метрополитена

Исходя из опросов, проведенных в европейских городах, метро является наиболее привлекательным видом общественного транспорта.

Основные критерии опросов:

1. Доступность была сопоставлена с ценой билета на общественный транспорт.

2. Безопасность сопоставлялась с воспринимаемым уровнем безопасности при использовании общественного транспорта.

3. Легкость получения соответствовала легкости посадки /высадки/ из вида общественного транспорта.

4. Частота была сопоставлена с частотой видов общественного транспорта.

5. Надежность соответствовала согласованности, описанной администратором, перевозчики/операторы видов общественного транспорта [4].

В период с 2024 по 2030 гг. в Красносельском районе планируют открыть пять станций метро, в том числе три из них будут расположены в самом развивающемся Южно-Приморском муниципальном округе и одна станция в наиболее густонаселенном Юго-Западном.

Данные станции метро снизят нагрузку на проспект Маршала Жукова и приведут к уменьшению интенсивности транспортного потока. Однако если проанализировать дорожную ситуацию некоторые проблемы еще будут существовать.

Далее на рис. 3 показана карта района с обозначенными станциями метро, которые планируется открыть к 2030 г.: Юго-Западная, Брестская, ул.Доблести, Петергофское шоссе и Сосновая поляна. Зеленым цветом изображены станции, которые планируется открыть после 2040 года, а пунктиром альтернативные направления.

Также на карте обозначены области № 1 и № 2. Это области плотного транспортного потока, который следует из муниципального округа Горелово, Красного Села и населенных пунктов Ломоносовского района Ленинградской области.

Далее на рис. 4 более подробно показана область № 2. Принята средняя статистическая загруженность на Яндексе в 8:00 утра, обычно в это время на данном участке ситуация более критичная. Но уже здесь можно видеть красную зону на пути к метро Юго-Западная и желтые зоны на пути к планируемым станциям Брестская, Доблести и Петергофское шоссе.

Учитывая, что загружены дороги, ведущие к этим станциям, можно предположить, что с появлением новых станций метро транспортная ситуация в этой области не улучшится, а с учетом того, что сами станции метро являются объектами транспортного тяготения, возможно загруженность на этих участках в дальнейшем станет еще больше.

Также до 2030 г. будет введена еще одна станция метро в Красносельском районе, в муниципальном округе Константиновская планируют открыть станцию метро «Сосновая поляна». Очевидно для транспортного потока, который следует из округов Красносельского райо-

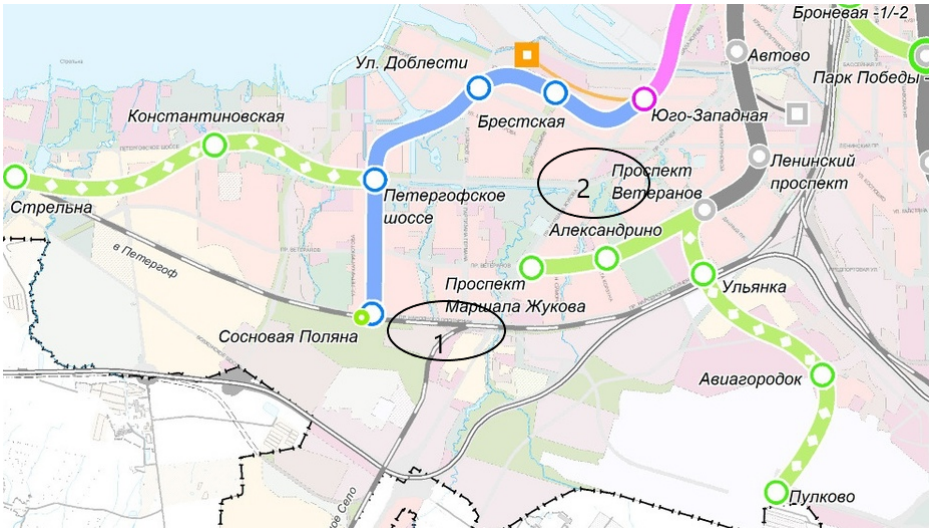


Рис. 3. Карта развития метрополитена в Красносельском районе [5]

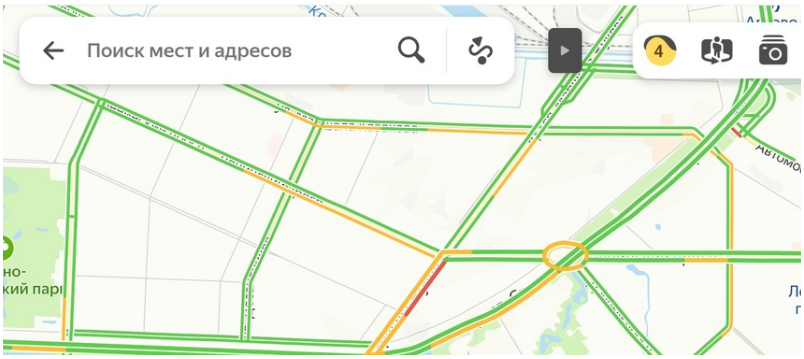


Рис. 4. Область № 2 в приложении Яндекс. Прогноз пробок в 8 утра [6]

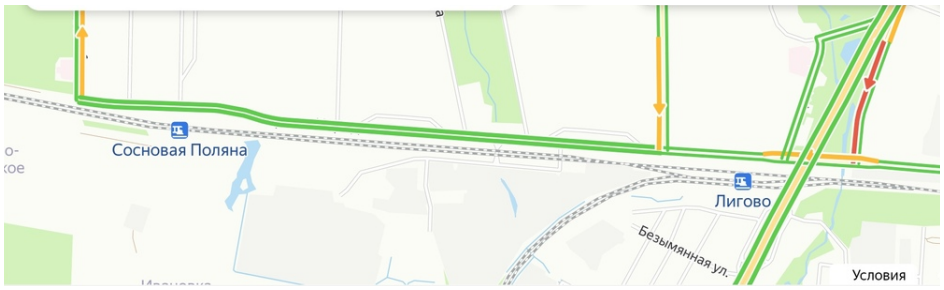


Рис. 5. Область № 1 в приложении Яндекс. Прогноз пробок в 8 утра [6]

на, Красное Село, Горелово и Ленинградской области, она должна быть более предпочтительной, так как расположена географически ближе к данным районам. Чтобы разобрать более подробно актуальность расположения данной станции можно вернуться к рис. 3 и области № 1.

На рис. 5 изображена область № 1, в которой принята, как и для области № 2 средняя статистическая загруженность на Яндексе в 8:00 утра. На рис. 5 можно увидеть, что съезд с проспекта Маршала Жукова на проспект Народного ополчения довольно сильно загружен и обозначен красным цветом, даже несмотря на то, что принят среднестатистический показатель, который не учитывает влияние возможных транспортных происшествий и ремонтных работ.

Так как проспект Маршала Жукова является основным и единственным выездом из Красно-

го Села и попутных районов в город, очевидно, что кратчайший путь не будет актуальным и для сокращения времени придется объезжать довольно большой участок города, чтобы попасть к станции метро Сосновая Поляна. А учитывая, что станция находится значительно дальше от центра города и промышленной зоны, чем все существующие и планируемые в ближайшее время станции этого района, делает ее менее привлекательной для населения. В отличие от других станций она находится в менее населенной области. Тем не менее, можно предположить, что данный район также будет застраиваться после появления станции и в конечном итоге в будущем добираться до нее для жителей района и Ленинградской области будет также проблематично.

Еще одной проблемой является нехватка маршрутов. Маршруты, проходящие мимо Сосновой Поляны – это маршруты, которые предназначены для небольшого района, чтобы доставить местное население до крупных транспортных узлов Лигово и ближайших станций метро, поскольку район расположен не на пути основных магистралей, ведущих из окраин и областей в центр. Иногда бывает быстрее добраться пешком до Проспекта Ветеранов, чем ждать пока там проедет какой-либо пассажирский транспорт, если там и будет метро, то с учетом нынешней транспортной системы пользоваться им в основном будет местное мало численное население.

Также надо учесть, что в Красном Селе и муниципальном округе Горелово живут более 100 000 человек. За последние 10 лет в этих округах был прирост в полтора раза, это без учета населенных пунктов Ленинградской области, маршруты которых также проходят через проспект Маршала Жукова.

Вернувшись к рис. 5 также можно обратить внимание на расположение железнодорожной станции Лигово и выделить ряд преимуществ:

1. Она находится на пересечении проспектов Народного ополчения и Маршала Жукова. Данные проспекты обладают большой пропускной способностью, которая даже в час пик не задействована в полной мере. Несмотря на проблему пересечения проспектов, станция находится в шаговой доступности от остановки на улице Безымянная, также есть возможность подъезда к станции со стороны улицы. Кроме того, по проспекту Народного ополчения можно доехать до станции за пару минут, поскольку проспект всегда свободен и на участке до станции Лигово практически не бывает пробок.

2. В данный момент уже существует множество маршрутов общественного наземного транспорта, проходящих через станцию, в данный момент 12 городских маршрутов проходят только по проспекту Народного ополчения, еще 26 городских и пригородных по Красносельскому шоссе. Для сравнения: через Сосновую Поляну проходят 5 маршрутов, и все эти маршруты также идут в Лигово.

3. Станция Лигово находится на пересечении двух веток железной дороги, что также делает ее более предпочтительной, как потенциальное место для строительства метро.

Единственной станцией из планируемых, которая могла бы разгрузить поток с Красносельского шоссе будет «Проспект Маршала Жукова», однако она запланирована только после 2040 г.

Заключение

Строительство метро требует огромных вложений и лучше строить его там, где оно нужнее. В целом в необходимости станций метро в густонаселенных районах Южно-Приморского округа и Юго-Западного округа сомнений нет, а станция метро «Петергофское шоссе» частично разгрузит область № 2 взяв на себя поток с Петродворцового района.

Вместо того, чтобы вести метро к Сосновой поляне, можно заняться другими транспортными проблемами, которых в районе немало. Примером является участок Красносельского шоссе от Красного Села до Горелово – на сегодняшний день это двухполосная дорога, на которой находятся от 24 до 19 автобусных маршрутов. В наиболее загруженное время интервал между автобусами составляет меньше минуты, из-за того, что на некоторых остановках этого участка нет карманов для остановок общественного транспорта или они слишком узкие, для проезда остается всего одна полоса движения, что приводит серьезным проблемам на участке. В целом на Аннинском и Красносельском шоссе наблюдается довольно сложная ситуация, с которой сталкиваются множество городов во всем мире. Из-за неконтролируемого процесса урбанизации масштабы владения транспортными средствами увеличились в геометрической прогрессии. Плотность дорог не дотягивает до нужной отметки по сравнению с увеличением объема трафика, что приводит к заторам [2]. На данном участке необходимо расширение дорог, возможно, с последующим выделением полосы для движения общественного транспорта. Результаты расчетов показывают, что если на участке дороги будет введена полоса движения автобусов, ожидается увеличение скорости их движения на 10% [7].

Также из вышеизложенного можно сделать вывод, что строительство станции метро в районе железнодорожной станции Лигово будет более актуально, чем в районе Сосновой Поляны. Как еще один вариант можно предложить перенести строительство станции метро «Проспект Маршала Жукова» на более ранний срок и заняться сначала ее строительством, так как она является более важной, через нее на данный момент проходят 45 маршрутов наземного транспорта, данное место обладает хорошей транспортной доступностью для всех точек Красносельского района. Строительство станции метро «Проспект Маршала Жукова» разгрузит все ближайшие станции и дороги к ним.

Библиографический список

1. *Цибулка Ян.* Качество пассажирских перевозок в городах: Издательский центр «Транспорт» 1987. 3 с.

2. *Оэль В*; *Чоудхари А*. Городская автобусная система; иерархия общественного транспорта; заторы на дорогах; урбанизация // Устойчивое развитие инфроструктуры. 27 марта 2022. С. 91–104. DOI:10.1007/978-981-16-6647-6_9.

3. Красносельский район (Санкт-Петербург). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki (дата обращения: 09.10.2022).

4. Проект EN.I.R.I.S.S.T.; уровень удовлетворенности; общественный транспорт; обследование на основе вопросников; выбор вида транспорта; мобильность студентов вузов / Е. Бухурас, С. Басбас, Г. Минцис, К. Таксилтарис [и др.] // Устойчивое развитие инфроструктуры. 27 марта 2022. DOI: 10.3390/su14074001.

5. План развития Петербургского метрополитена. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения: 09.10.2022).

6. Прогнозирование дорожной ситуации. URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.315635%2C59.938951&z=11 (дата обращения: 09.10.2022).

7. *Цои А., Сассано М. Валентини*. Автоматизированный мониторинг транспортных средств; связывание автобусов; автобусные перевозки // Процедура транспортных исследований. Январь 2022 г. DOI: A10.1016/j.trpro.2022.02.040.

УДК 656.025.2 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-137-142**

Е. А. Гайдук*
студент
А. А. Добровольская*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ

В данной статье рассмотрены преимущества применения беспилотных авиационных систем на объектах транспортной инфраструктуры в России и других странах, а также произведен обзор исследований уже применяемых технологий. Разработан, протестирован и описан алгоритм обработки в реальном времени данных, собираемых дроном, и произведен анализ возможности применения такого типа обработки, его преимущества и недостатки.
Ключевые слова: *беспилотная авиационная система, транспортная интеллектуальная система, анализ данных, обнаружение препятствий, безопасность на транспорте.*

E. A. Gaiduk*
Student
A. A. Dobrovolskaia*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS AT TRANSPORT FACILITIES AND DEVELOPMENT OF A DATA POST-PROCESSING ALGORITHM

This article discusses the advantages of using unmanned aircraft systems at transport infrastructure facilities in Russia and other countries, as well as a review of research and technologies already used. An algorithm for processing real-time data collected by a drone has been developed, tested and described, and the possibility of using this type of processing, its advantages and disadvantages have been analyzed.
Keywords: *unmanned aircraft system, transport intelligent system, data analysis, obstacle detection, transport safety.*

Введение

В последние несколько лет беспилотные авиационные системы активно встраиваются в жизнь людей. Они применяются и в сельском хозяйстве, и в логистике, и на производстве, и в строительстве, и в энергетике [1]. Такое широкое применение дронов обуславливается большим количеством возможностей, которые они открывают, например:

– Сокращение времени выполнения операций;

– Работа в труднодоступных регионах.

– Повышение точности оценки ситуации.

– Применение в районах повышенной опасности.

– Задание автономных полетных миссий.

– Маленькая высота подъема, следовательно, высокое качество аэрофотосъемки.

– Увеличение мобильности.

– Снижение стоимости работы.

– Экономия человеческого ресурса и «страховка от человеческого фактора».

Таким образом, дроны позволяют заменить опасный или монотонный человеческий труд машинным, повышая эффективность и безопасность работы. Именно поэтому беспилотники активно используются в интеллектуальных транспортных системах для обеспечения безопасности в других странах: США, Великобритании, Франции, Японии. Использование дронов в антитеррористических и полицейских операциях получается выгоднее, чем выезды

бригад на вертолетах и автомобилях [2]. В России из-за малого финансирования беспилотники не так активно применяются государством, их используют преимущественно в военных целях и при ликвидации чрезвычайных ситуаций МЧС. При этом беспилотные авиационные системы могут значительно повысить эффективность транспорта. Кроме того, они очень быстро окупаются благодаря низкой стоимости и широкому спектру решаемых задач, таких как мониторинг зон транспортной безопасности, преследование преступников, связь с полицией, воздушная разведка, причем беспилотные системы могут охватывать большие площади за короткий срок. Таким образом, практически беспрерывный мониторинг может обеспечивать бесперебойную работу транспортных систем.

Применение беспилотных авиационных систем для мониторинга состояния объектов транспортной инфраструктуры

Одним из примеров использования дронов на транспорте является мониторинг состояния дорог Стойленского горно-обогатительного комбината группой НЛМК [3]. От состояния дорог на карьере зависит многое: расход топлива и износ шин самосвалов, перевозящих руду, сроки и бесперебойность доставки, безопасность сотрудников. При этом маршруты на карьере регулярно меняются, и это нужно учитывать, а суммарная протяженность дорог на карьере – 25 км. Исходя из всех фактов, компанией было принято решение использовать не только выездных дорожных инженеров, но и беспилотные воздушные суда самолетного типа (рис. 1).

Метод работы основан на фотограмметрии: беспилотное воздушное судно производит полет по заданной области миссии и аэрофотосъемку, затем данные с беспилотника загружаются в аналитическую платформу Skyeer [4]. С помощью разработанного алгоритма машинного зрения автоматически проводятся расчеты необходимых параметров и составляется отчет о состоянии дорог (рис. 2), в качестве параметров для составления отчета выступают уклон, ширина дороги. Благодаря этому нововведению оценка состояния дорог на карьере ускорилась в

Рис. 1. Беспилотное воздушное судно самолетного типа SenseFly eBee X, используемый НЛМК

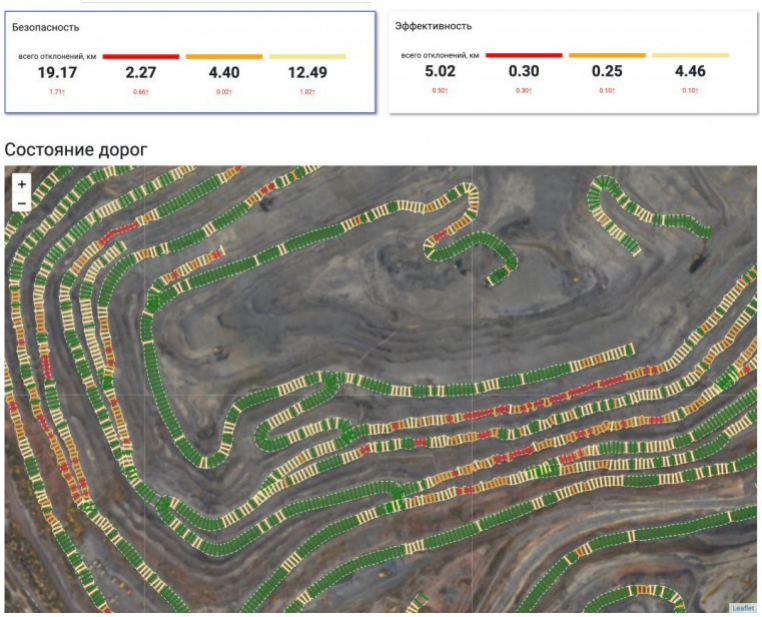


Рис. 2. Результат работы метода

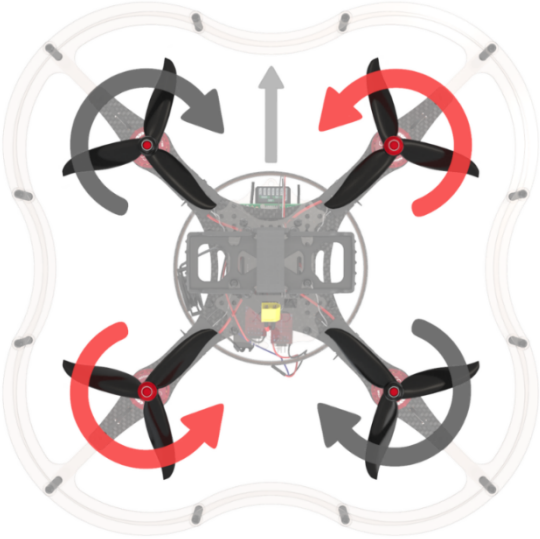


Рис. 3. Схема расположения винтов

5 раз, что позволило компании за 2021 г. сэкономить 6% на расходе топлива.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритмы, позволяющие производить визуальный анализ объектов, обладают высокой применимостью не только в узкоспециализированной задаче мониторинга дорог на карьере, но и могут быть применены для похожих задач на объектах транспортной инфраструктуры.

В данном случае, была рассмотрена задача построения алгоритма, который распознает объекты на дорожном полотне. Исследование может быть применимо при паспортизации автомобильных дорог [5], при которой производится съемка дороги и оценка ее технического состояния. При использовании метода отсутствует необходимость хранения большого объема данных фотосъемки и создания цифровой модели, поскольку при работе алгоритма производится считывание данных автоматически в процессе полета.

Алгоритм обнаружения препятствий и обработка данных в процессе полета

Использованные технологии:

– Учебный программируемый квадрокоптер COEX Clover 4 [6]. Дрон имеет 4 винта, балансирующих друг друга (рис. 3), что позволяет ему зависать в воздухе, вертикально взлетать, свободно поворачиваться и наклоняться. На нем установлены полетный контроллер COEX Pix с полетным стеком PX4, одноплатный компьютер Raspberry Pi 4, широкоугольная камера, позволяющая ориентироваться в пространстве по Aruco-меткам, лазерный дальномер STM VL53L1X.

– 3D-симулятор Gazebo использовался для проверки работы программного кода до его запуска на реальном дроне в полетной зоне.

– Фреймворк ROS позволяет запускать автономные полетные миссии, связывая системы коптера и пользователя.

Работа алгоритма

Исследование проводится в ГУАП на базе лаборатории беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП. Алгоритм, написанный на языке Python, с помощью лазерного дальномера ищет посторонние объекты на летном поле, которое является условным дорожным полотном (рис. 4). Универсальность алгоритма связана с тем, что он может быть легко модифицирован под другие задачи при выборе других датчиков.

Коптер сравнивает высоту, полученную с телеметрии с высотой, полученной с дальномера, так как телеметрия отражает координату Z в системе координат коптера, а дальномер показывает высоту под ним, т. е. расстояние до ближайшей поверхности. Большой перепад высот считается потенциальным препятствием. Большим перепадом высот в алгоритме считается 0,2 м.

Далее запускается функция очистки базы данных. Иногда в системах коптера происходят сбои: потеря Aruco-меток, неверное определение собственной высоты, и это необходимо предусмотреть. Но если при реальном препятствии перепад высот засекается несколько раз, то в таких случаях это, как правило, одна точка, что и позволяет определить лишние данные. Поэтому при обнаружении точки перепада высот, координаты не сразу записываются в итоговую базу, а сначала во временную. При наборе 3 и более обнаруженных точек происходит сравнение: если до или после сравниваемой точки, находятся другие перепады высот, она считается обнаруженным препятствием (рис. 5).

Эта точка возвращается в функцию записи в базу данных. В случае, если это первая точка обнаруженного препятствия, его координаты записываются отдельной строкой в базу данных, если же координаты новой возвращенной точки мало отличаются от координат одной из уже записанных, то происходит коррекция данных: изменение минимальной и максимальной координат или высоты при необходимости. Тестирование алгоритма в симуляторе показано на рис. 6 и 7.

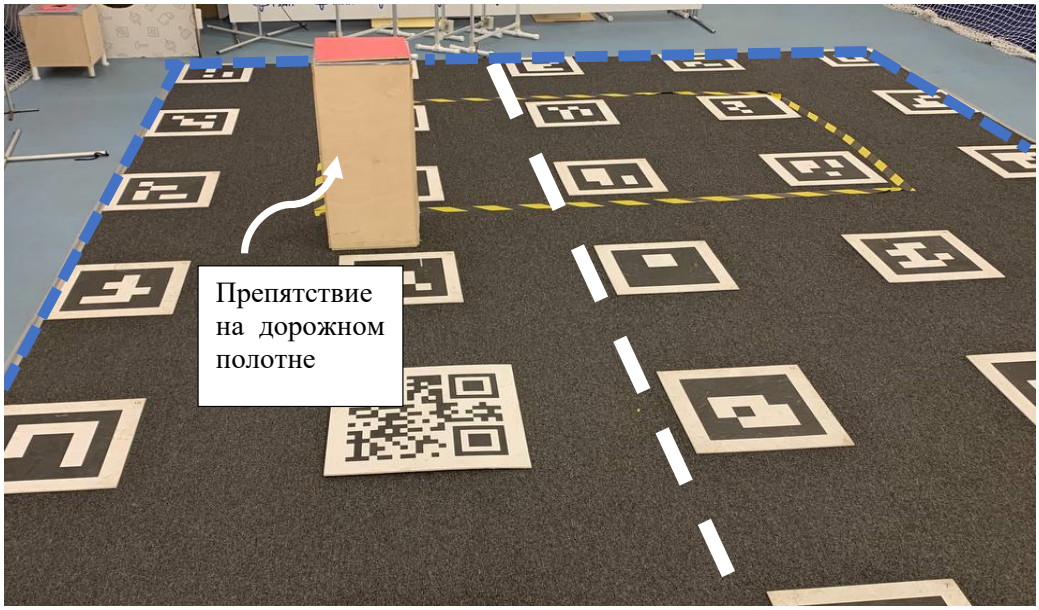


Рис. 4. Летное поле, на котором расположено препятствие

```python
def obst(telem1, diff):
    global flag, data_b #data_b -- data base with obstacle info, flag is raised if we have found a new obstacle
    next_obst = cleaning_base(data_b,telem1, diff)
    if (next_obst!=None):
        for i in range (len(data_b)):
            #temporary_data_base = [x, y, heigth]
            #['min x', 'max x', 'min y', 'max y', 'max heigth']
            coord_y=(next_obst[1]>data_b[i][2] and next_obst[1]<data_b[i][3])
            coord_x=(next_obst[0]>data_b[i][0] and next_obst[0]<data_b[i][1])
            print("coord_x", coord_x, "coord_y", coord_y)
            if len(data_b)==0 or (coord_y == False and (abs(next_obst[1]-data_b[i][2])>0.5 or abs(next_obst[1]-data_b[i][3])>0.5)) or (coord_x == False and (abs(nex
                flag=True
            else:
                flag=False    #correction of the coordinates of an already found obstacle
                if next_obst[0]<data_b[i][0]:
                    data_b[i][0] = round(next_obst[0],3)
                if next_obst[0]>data_b[i][1]:
                    data_b[i][1] = round(next_obst[0],3)
                if next_obst[1]<data_b[i][2]:
                    data_b[i][2] = round(next_obst[1],3)
                if next_obst[1]>data_b[i][3]:
                    data_b[i][3] = round(next_obst[1],3)
                if next_obst[2]>data_b[i][4]:
                    data_b[i][4] = round(next_obst[2],3)
                print("d_b_f", data_b)
        if flag==True: #recording coordinates of a new obstacle
            data_b.append ([round(next_obst[0],3), round(next_obst[0],3), round(next_obst[1],3), round(next_obst[1],3), round(next_obst[2],3)])
            print("d_b_f", data_b)

#using this function will cut off the smallest obstscles
def cleaning_base (data_b,telem1, diff):#removing bugs from the data base
#temporary_data_base = [x, y, heigth]
    global temporary_data_base
    if len(temporary_data_base)<3:
        temporary_data_base.append([round(telem1.x,3), round(telem1.y,3), round(diff,3)])

    elif len(temporary_data_base)==3:
        temporary_data_base.append([round(telem1.x,3), round(telem1.y,3), round(diff,3)])
        if (abs(temporary_data_base[0][0]-temporary_data_base[1][0])<0.3 and abs(temporary_data_base[0][1]-temporary_data_base[1][1])<0.3):
            return(temporary_data_base[0])

    else:
        print("clean3")
        del(temporary_data_base[0])
        temporary_data_base.append([round(telem1.x,3), round(telem1.y,3), round(diff,3)])
        if ((abs(temporary_data_base[2][0]-temporary_data_base[1][0])<0.3 and abs(temporary_data_base[2][1]-temporary_data_base[1][1])<0.3) or (abs(temporary_data_b
            return([temporary_data_base[1]])
```

Рис. 5. Отрывок программного кода с описанными функциями

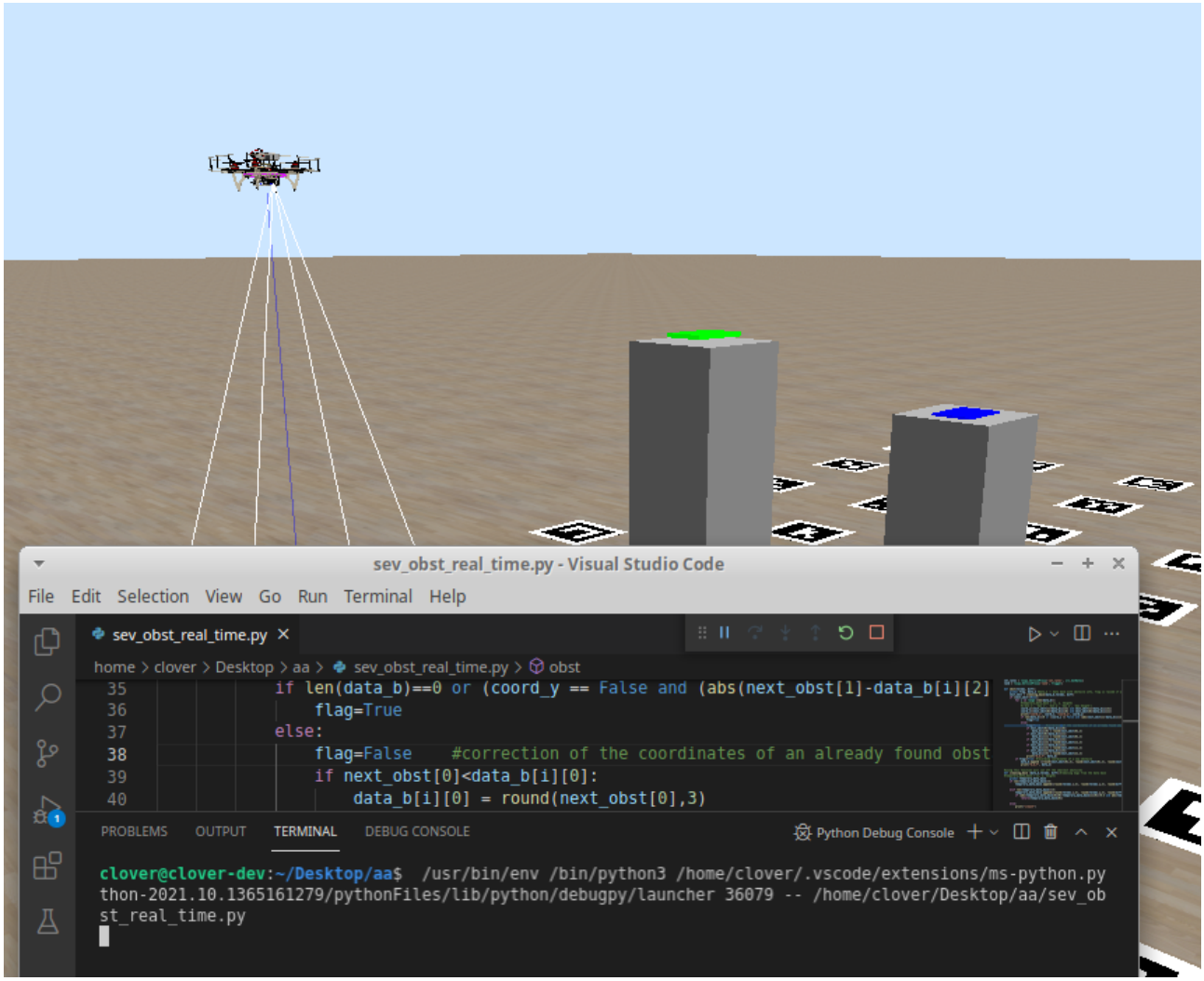


Рис. 6. Тестовый полет в симуляторе

xmin	xmax	ymin	ymax	height
0.76	1.226	1.112	1.593	0.941
1.842	1.924	1.644	1.976	0.583

Рис. 7. Результат работы алгоритма

Выводы

Данный алгоритм актуален, в случае необходимости быстрого решения поставленной задачи, так как возможно выводить данные в процессе полета, а не по его окончанию. Недостатком используемого метода является высокая ресурсоемкость, он требует сравнительно высоких вычислительных мощностей компьютера. Это было выявлено при запуске в полетной зоне: дрон чаще терял Aruco-метки, происходило больше сбоев в полете по сравнению с постобработкой [6]. Это происходит из-за того, что одна и та же строка базы данных проверяется многократно, тогда так при постобработке она проверяется единожды. Однако, при тестировании кода в симуляторе подобных ошибок не возникает, что говорит о том, что алгоритм верен.

Данная проблема легко решается выбором компьютера с большей вычислительной мощностью или обработкой данных во внешних системах, а не в системах дрона. Несмотря на то, что был приведен пример алгоритма по обнаружению препятствий, например поваленных ураганом деревьев, код легко модифицируется и под другие ситуации: если поставить датчик температуры, можно определить места повреждения нефтепроводов. Таким образом, этот метод может использоваться в различных ситуациях в том числе на объектах транспортной инфраструктуры или при различных чрезвычайных ситуациях.

Библиографический список

1. Сферы применения беспилотных летательных аппаратов. URL: https://docs.geoscan.aero/ru/master/database/base-module/sphere/sphere.html (дата обращения: 11.12.2022).

2. Использование беспилотных летательных аппаратов для обеспечения безопасности на объектах транспорта. URL: https://russiandrone.ru/publications/ispolzovanie-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-dlya-obespecheniya-bezopasnosti-na-obektakh-transpor/ (дата обращения: 11.12.2022).

3. Как дроны помогают нам управлять состоянием дорог в рудном карьере. URL: https://habr.com/ru/company/nlmk/blog/650419/ (дата обращения: 11.12.2022).

4. Skyeer. Удаленный мониторинг объектов. URL: https://skyeermap.com/ (дата обращения: 13.12.2022).

5. ГОСТ 33388-2015 Требования к проведению диагностики и паспортизации. URL https://docs.cntd.ru/document/1200135143 (дата обращения: 13.12.2022).

6. *Карпова Т. Ю., Костин А. С., Майоров Н. Н.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем: учеб. пособие; под ред. д-ра техн. наук Н. Н. Майорова. СПб.: ГУАП, 2021. С. 48–65.

УДК 658.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-143-145**

Д. Л. Головцов*
кандидат технических наук, доцент
М. Ю. Сучкова**
директор центра сопровождения научной деятельности
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный экономический университет*

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛОГИСТИЧЕСКИХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

В данной статье рассмотрен подход к построению цифрового двойника для повышения и обеспечения качества логистических бизнес-процессов. Рассматривается процесс определения передаточной функции логистических бизнес-процессов как объекта управления с помощью модели авторегрессии с распределенными лагами.
Ключевые слова: *логистика, управление качеством, передаточная функция, авторегрессия с распределенными лагами.*

D. L. Golovtsov*
PhD, Tech., Associate Professor
M. Y. Suchkova**
Director of the Research Support Center
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State University of Economics*

SYNTHESIS OF A DIGITAL TWIN TO ENSURE THE QUALITY OF LOGISTICS BUSINESS PROCESSES

This article discusses an approach to building a digital twin to improve and ensure the quality of logistics business processes. The process of determining the transfer function of logistics business processes as a control object using an autoregressive model with distributed lags is considered.
Keywords: *logistics, quality management, transfer function, autoregressive with distributed lags.*

Вопросы повышения уровня управления качеством логистических процессов в современных экономических условиях имеют первостепенную значимость, поскольку уровень качества логистических услуг является одним из критериев эффективности управления логистическими процессами.

Если рассматривать инструменты менеджмента качества, которые применяются в управлении качеством логистических процессов, то можно выделить следующие укрупненные их группы: анализ качества, контроль качества, управление качеством и организационно-распорядительные и экономические инструменты качества.

По нашему мнению, к последней укрупненной группе можно отнести и внедрение цифрового двойника, как элемента системы всеобщего производственного обслуживания.

Технология использования цифровых двойников появились более 10 лет назад и широко используются в секторе производства, позволяя моделировать в цифровой среде будущие продукты, процесс их производства и эксплуатации [1]. Цифровой двойники могут быть использованы применительно к объектам и процессам, что позволяет повысить вовлеченность и удовлетворенность заинтересованных сторон, и обеспечить более тщательный анализ и прогнозирование отклонений качества в различных средовых условиях.

Для эффективного внедрения и реализации цифрового двойника в управлении качеством бизнес-процессов промышленного предприятия предлагается использовать алгоритм, представленный на рис. 1.

Цифровой инструментарий позволяет менеджерам качества эффективно выполнять управление качеством логистических бизнес-процессов в условиях неопределенности. Однако в современных условиях остро стоит пробле-

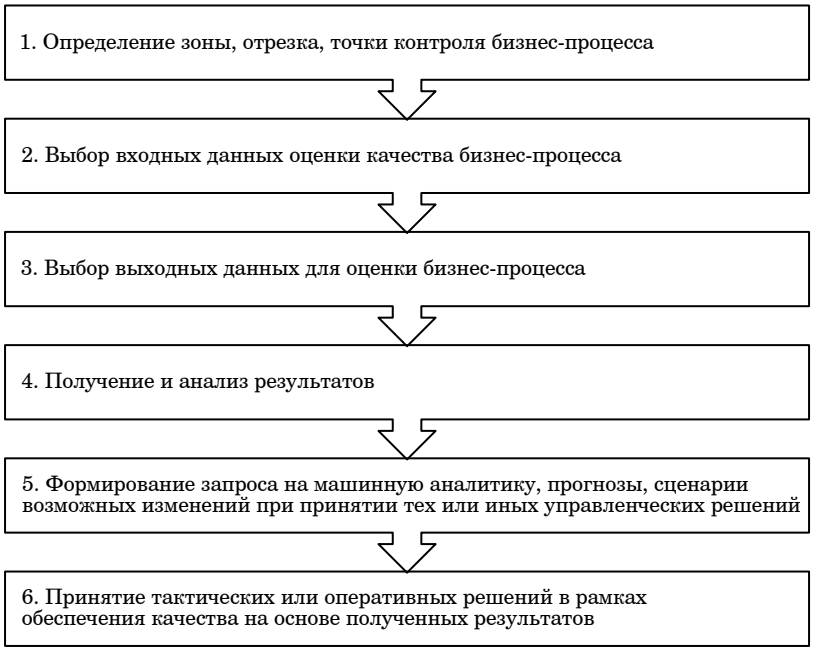


Рис. 1. Алгоритм эффективного внедрения и реализации цифрового двойника в управлении качеством логистических бизнес-процессов

ма управления качеством еще на стадии проектирования, поскольку именно при разработке проекта возможно избежать рисков сбоев самого логистического процесса.

Таким образом, для функционирования цифрового двойника предложена схема управления данными проекта бизнес-процесса, до начала реализации бизнес-процесса. Для ее создания целесообразно принять, что отклонение в определенный момент времени возникает в результате воздействия различных факторов детерминированной и недетерминированной природы, и отклонение возникает случайным образом.

При этом поддержка заданных характеристик качества бизнес-процесса или устойчивость качества бизнес-процесса зависит от своевременной оценки тех или иных показателей качества и от характеристик и состава управленческих действий, направленных на достижение целей логистического процесса через обеспечение качества процесса на этапе проектирования, т. е. от характеристик системы управления (СУ).

Так как любой бизнес-процесс, в том числе и логистический, представляет собой совокупность связанных мероприятий, в результате которых ресурсы предприятия преобразуются в конечный продукт (услугу) для достижения поставленных результатов, то логистический бизнес-процесс можно представить как объект управления (ОУ) на вход которого подается управляющее воздействие $u(t)$, представляющее собой затраченные усилия на реализацию (управление) логистического бизнес-процесса, и количественная оценка затраченных усилий может быть выражена через количество затраченных ресурсов, бюджетные ассигнования и т. д., а выход ($y(t)$) представляет собой оценку качества логистического бизнес-процесса.

В качестве показателей качества могут выступать показатели надежности, скорости доставки, сохранности перевозимых грузов, доступности, функциональности, безопасности процесса предоставления услуг для окружающей среды [2]. Также выход $y(t)$ может быть представлен векторной или интегральной величиной.

Тогда задача обеспечения качества логистического бизнес-процесса может быть формализована моделью СУ, структурная схема которой в общем виде показана на рис. 2. Где УУ – устройство управления, вырабатывает управляющее воздействие $u(t)$ в зависимости от ошибки управления $e(t)$, которая представляет собой разность между наблюдаемым значением

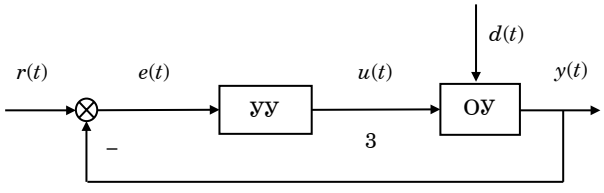


Рис. 2. Структурная схема СУ

показателя качества и целевым (эталонным) значением этого показателя $r(t)$. Вторая входная величина $d(t)$ является возмущением, воздействующим на ОУ [3].

Модель ОУ может быть представлена разностным уравнением, где выходная переменная зависит от собственных значений в предыдущие моменты времени и от значений в предыдущие моменты времени входной переменной:

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \ldots + a_n y(t-n) + \\ + b_1 u(t-1) + \ldots + b_m u(t-m). \quad (1)$$

Данное выражение представляет собой авторегрессию с распределенными лагами.

Оценка параметров модели методом наименьших квадратов предполагает построение ряда моделей с различным количеством лагов и отбор наиболее пригодной в зависимости от тестов на нормальность, гомоскедастичность и автокорреляцию остатков.

По выбранной регрессионной модели строится передаточная функция (ПФ) ОУ [4].

Далее в зависимости от требований к устойчивости, качеству переходного процесса, точности и чувствительности СУ производится синтез ПФ УУ.

После определения параметров СУ, модель цифрового двойника логистического бизнес-процесса в виде структурной схемы или модели в пространстве состояний позволяет проводить моделирование поведения системы в зависимости от внешних возмущений, ошибок и задержек измерений контролируемых показателей качества.

Библиографический список

1. *Прохоров А., Лысачев М.* Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / науч. ред. Боровков А. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

2. *Аристов В. М.* Формирование моделей системы оценки качества логистических услуг в цепях поставок // Вестник Ленинградского государственного университета им. А. С. Пушкина. 2012. Т. 6. № 4. С. 48–58.

3. *Hellerstein J. L., Diao Y., Parekh S., Tilbury D. M.* Feedback Control of Computing Systems. John Wiley & Sons, 2004. 430 p.

4. Анализ временных рядов: прогноз и управление / Д. Бокс, Г. Дженкинс; перевод с англ. А. Л. Левшина; под ред. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. 197 с.

УДК 681.5:519.2:658.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-146-155**

В. М. Денин*
магистрант
А. С. Костин*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ОБЛАСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Статья посвящена анализу публикационной активности в области двигателей внутреннего сгорания для беспилотных авиационных систем на основе наукометрической базы Scopus. На основе сформированной выборки документов выполнено исследование публикаций в программе VOSviewer и BIBLIOMETRIX с 2017 по 2022 год. В статье представлена аналитика по ключевым словам и по авторам, а также произведено ранжирование публикаций по значимости в рейтингах с помощью информационной системы. Представлены ключевые авторы и данные, которые позволяют определить вектор развития в исследуемой области.
Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты, беспилотные авиационные системы, двигатели внутреннего сгорания, автономные летательные аппараты, дроны, подъемная сила, полезная нагрузка.*

V. M. Denin*
Postgraduate Student
A. S. Kostin*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SCIENTOMETRIC ANALYSIS IN THE FIELD OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES FOR UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

The article is devoted to the analysis of publication activity in the field of internal combustion engines for unmanned aerial systems based on the Scopus scientometric database. Based on the generated sample of documents, a detailed study of publications in the VOSviewer and BIBLIOMETRIX programs from 2017 to 2022 was carried out. The article presents analytics by keywords and by authors, as well as the ranking of publications by importance in ratings using an information system. Key authors and data are presented that allow determining the vector of development in the study area.
Keywords: *unmanned aerial vehicles, unmanned aerial systems, internal combustion engines, autonomous aerial vehicles, drones, lifting force, payload.*

Введение

На текущий момент времени беспилотные авиационные системы все чаще применяются в различных сферах деятельности: организация доставки грузов, авиамониторинг, исследование объектов инфраструктуры и так далее. Для выполнения данных задач требуется использование современных технических систем, в частности двигателей. Выбранная область исследования является актуальной, так как все чаще в настоящее время увеличивается потребность в беспилотных летательных аппаратах. Изучение критериев двигателя внутреннего сгорания для беспилотных летательных аппаратов представляет интерес в развитии инфраструктуры городов и регионов. Это обосновано большим набором функциональных возможностей этих аппаратов. Беспилотные авиационные системы могут использоваться в целях мониторинга, в чрезвычайных ситуациях, в поисковых работах, для аэрофотосъемки и пр. Выбор двигателя внутреннего сгорания под определенные задачи – это одна из ветвей направления кафедры системного анализа и логистики. Главная характеристика любого летательного аппарата – практическая дальность полета и масса полезной нагрузки. Она в основном зависит от количества энергии, запасенной в двигателе беспилотных летательных аппаратов [2, 3, 4]. Выбор

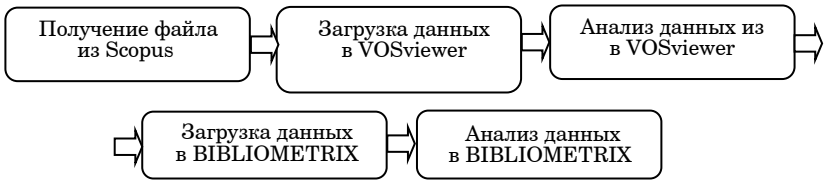


Рис. 1. Логика проведения анализа

силовой установки для беспилотника должен зависеть от поставленной задачи, а также от климатических условий [2]. Модель анализа и выполнения наукометрического исследования приведено на рис. 1.

Беспилотные авиационные системы применяются во многих различных задачах и требуют различных типов двигателей в зависимости от области, в которой они используются для выполнения задач, например выполнения авиамониторинга, организации доставки грузов и так далее. Для реализации данных задач используются различные типы беспилотных авиационных систем с разными силовыми установками. Наиболее распространены поршневые и электрические двигатели. Беспилотные авиационные системы также различаются по размеру и типу двигателя пропорционально размеру и весу самолета, как и у обычных самолетов. Электрические двигатели обычно используются в легких и малых БАС, поршневые двигатели используются в тяжелых и больших моделях.

Далее более подробно рассмотрим примеры используемых двигателей для беспилотных авиационных систем.

Электродвигатели

В электрических силовых установках с батарейным питанием используется двигатель для вращения пропеллеров дронов. Подобные двигатели двигатели используются в беспилотных авиационных системах мультироторного типа, беспилотных авиационных системах с неподвижным крылом, которые полагаются полет, а также в гибридных системах. Электродвигатели для БАС и других беспилотных средств могут быть щеточными, которые проще, но более шумные и более подвержены износу, или бесщеточными двигателями, которые более эффективны, но часто дороже.

Электрические силовые установки необходимы для многороторных БАС из-за более точного управления и меньшего времени отклика, что крайне необходимо для регулировки управления дифференциальной тягой, необходимой для зависания. Они больше подходят для небольших самолетов из-за относительной громоздкости и лишнего веса двигателей внутреннего сгорания и жидкого топлива, а также более надежны.

Недостатком электрических силовых установок является то, что батареи имеют более низкое отношение энергии к весу, чем топливо, и поэтому обеспечивают значительно более короткое время полета. Аккумуляторам также требуется время для перезарядки, поэтому подготовка к последующим полетным миссиям займет больше времени, чем просто заправка топливного бака, если несколько аккумуляторов недоступны.

Двигатели внутреннего сгорания для беспилотных авиационных систем

Двигателями БАС могут быть поршневые двигатели внутреннего сгорания, роторные двигатели или газотурбинные двигатели. Двигатели БАС часто включают в себя такие системы, как системы впрыска топлива и системы управления двигателем, для обеспечения большей эффективности.

Роторные двигатели БАС, включая двигатели Ванкеля, используют ротор внутри корпуса для выполнения цикла сгорания. Они производят меньшую вибрацию, чем двигатели с поршневым приводом, и имеют благоприятное соотношение мощности к весу, но могут быть менее экономичными и требуют большего обслуживания. Газотурбинные двигатели более надежны и обеспечивают большую удельную мощность, чем поршневые и роторные двигатели, но их разработка дороже, и в настоящее время они пригодны только для более крупных БАС. Подобный тип двигателей в основном используются в беспилотных авиационных системах с невращающимся крылом.

Гибридные двигатели беспилотных авиационных систем

На текущий момент времени постепенно внедряются гибридные газоэлектрические двигатели, которые используют как двигатель

внутреннего сгорания, так и батареи для электродвигателя. Энергетическая нагрузка распределяется между двумя системами, а это означает, что можно использовать меньший по размеру и более эффективный двигатель, а также гибридные системы обеспечивают большее время полета по сравнению с беспилотными авиационными системами аналогичного размера, работающими только от батареи или топлива, что позволяет реализовывать выполнение таких задач, как автономная доставка посылок и расширенные миссии по наблюдению и проверке.

Другие типы двигателей для беспилотных авиационных систем

Технологии двигателей на топливных элементах также разрабатываются для беспилотных авиационных систем. Топливные элементы используют водород для выработки электрического тока, который можно использовать для питания двигателя. Водород имеет более высокую плотность энергии, чем современная аккумуляторная технология, и производит только воду в виде выбросов. Однако в настоящее время эта технология очень дорогая, а хранение и транспортировка водорода крайне сложна ввиду того, что для хранения необходимо использовать особые емкости.

Далее рассмотрим наукометрическую картину в области исследования двигателей беспилотных авиационных систем и рассмотрим этапы формирования наукометрического исследования.

Этапы создания наукометрической картины в программе VOSviewer

Этап 1. Выбор типа данных. На данном этапе нужно определить тип данных для создания карты на основе библиографических данных. Этот параметр применяется при создании соавторства, совпадения ключевых слов, цитирования библиографической связи или карты совместного цитирования на основе библиографических данных.

Этап 2. Выбор источника данных. Необходимо выбрать пункт считывания данных из файлов: Web of science, Scopus, Dimensions и PubMed.

Этап 3. Выбор файлов. На данном этапе, загружаются файлы из Scopus в разрешении csv.

Этап 4. Выбор типа анализа и метод подсчета. На данном этапе выбирается тип анализа – соавторство, единица анализа – по авторам, метод подсчета – полный.

Этап 5. Выбор пороговых значений. На данном этапе устанавливается минимальное количество документов авторов – 1.

Этап 6. Проверка выбранных авторов и ключевых слов для файла «scopus» изображены на рис. 2 и 3. На данном этапе формируется список авторов и ключевых слов, которых можно сохранить в виде документ формата «.txt».

Результатом работы в VOSviever стала наукометрическая картина из максимальных 4343 ключевых слов. Слово «Uav» является наиболее встречаемым, оно упоминается 106 раз и имеет 311 связи с другими словами, на втором месте «Autonomous aerial vehicles» – 26 и 280, на третьем «deep learning» – 75 и 154 и далее следуют ключевые слова, встречающиеся от 51 до 1 раза.

Выполнение наукометрического анализа в программе BIBLIOMETRIX

Этап 1. Основная информация о файле представлена в табл. 1.

Для выполнения задания, необходимо создать новый проект на сайте в программе BIBLIOMETRIX, где с помощью Biblioshiny можно провести анализ данных [1].

Основная информация о файле содержит такие сведения, как, например, среднее цитирование, в данном случае оно равно 0,07328 (рис. 4).

В период с 2017 по 2022 гг. наблюдался рост количества статей, который еще не достиг своего пика. В 2017 г. – 1, в 2018 – 0, в 2019 г. – 7, в 2020 г. – 2, в 2021 г. – 429, в 2022 г. – 721. С 2017 по 2021 гг. количество статей выросло в 429 раз (табл. 2).

На данном этапе, представленным на рис. 5, определяется среднее количество цитирований статей в год. В связи с тем, что пик приходится на 2022 год, можно сделать вывод о том, что к 2022 среднее цитирование снизилось из-за большого количества новых статей.

Этап 4. Определение Индекса Хирша. Для данного файла Индекс Хирша у всех авторов одинаковый и равен 1. Результаты проведенной работы, представленные на рис. 6, могут свидетельствовать о том, что данная тема является новой, пока еще мало изученной учеными.

Ранжирование публикаций по значимости в рейтингах

Квартиль (Q) – степень престижности, популярности журнала в базе данных Scopus [5]. Их всего 4 – Q1, Q2, Q3 и Q4. Q1 – самый высокий квартиль, Q4 – самый низкий. В Scopus квартилями обладают журналы, которые индексируются в нем 3 года и более.

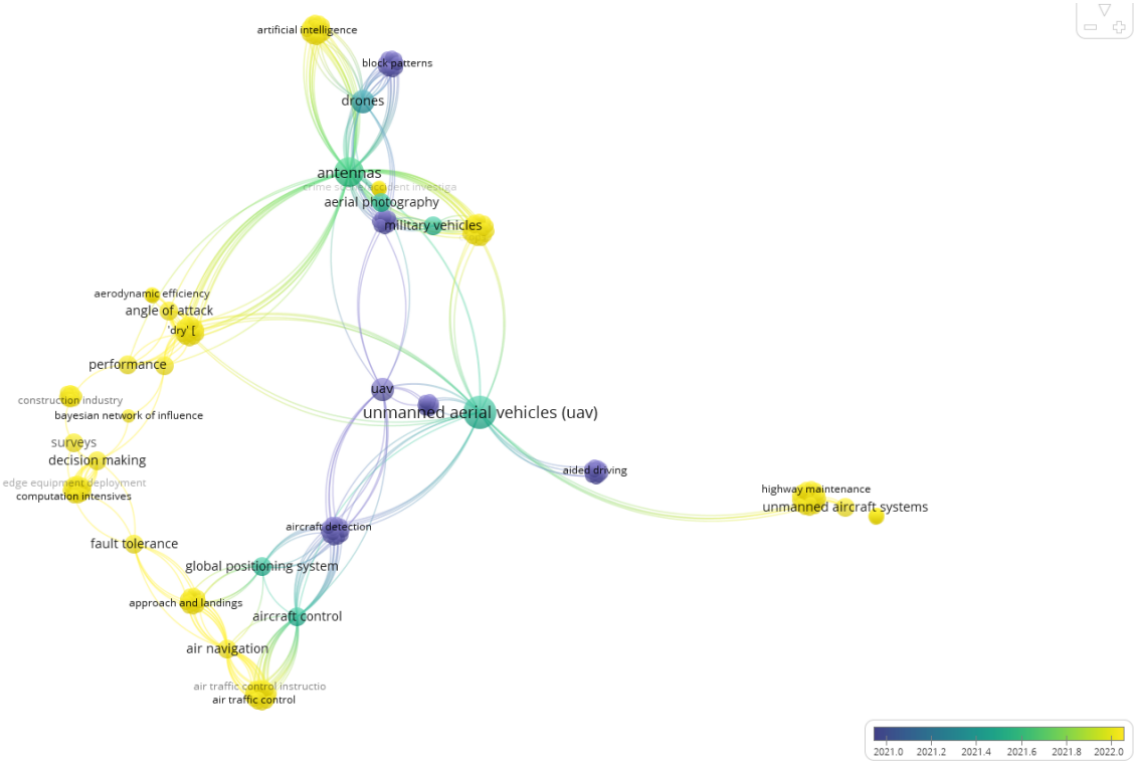


Рис. 2. Визуализация сети по ключевым словам из файла Scopus

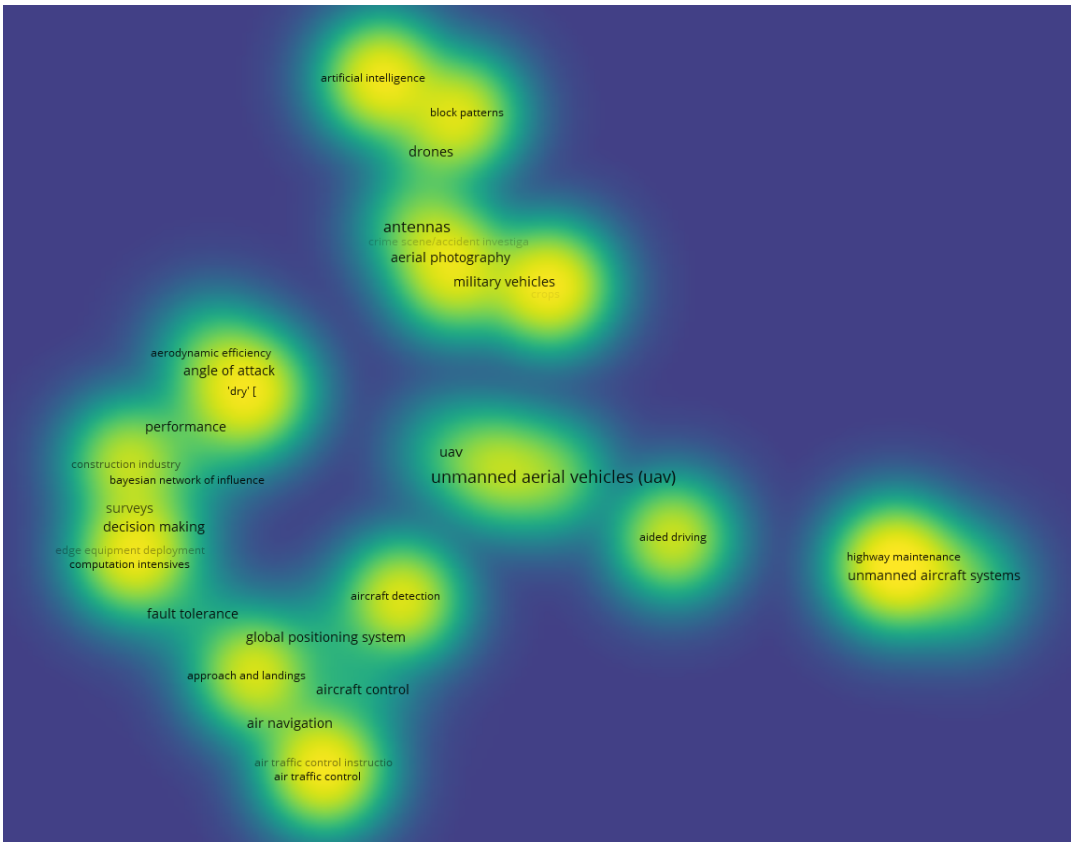


Рис. 3. Визуализация плотности по ключевым словам из файла Scopus

Таблица 1

Основная информация о файле

Description	Results
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
Timespan	2017:2022
Sources (Journals, Books, etc)	457
Documents	1160
Average years from publication	0.396
Average citations per documents	0.07328
Average citations per year per doc	0.02888
References	32129
DOCUMENT TYPES	
article	541
book chapter	49
conference paper	512
conference review	27
editorial	2
letter	1
note	1
review	25
short survey	1
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	7511
Author's Keywords (DE)	3511
AUTHORS	
Authors	3431
Author Appearances	4908
Authors of single-authored documents	32
Authors of multi-authored documents	3399
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored documents	259
Documents per Author	0.4338
Authors per Document	2.96
Co-Authors per Documents	4.23
Collaboration Index	3.09

Таблица 2

Среднее количество цитирования в год

Year	№	MeanTCperArt	MeanTCperYear	CitableYears
2017	1	0	0	5
2018	0	0	0	0
2019	7	8.85714285714286	2.95238095238095	3
2020	2	0	0	2
2021	429	0.0233100233100233	0.0233100233100233	1
2022	721	0.0180305131761442		0

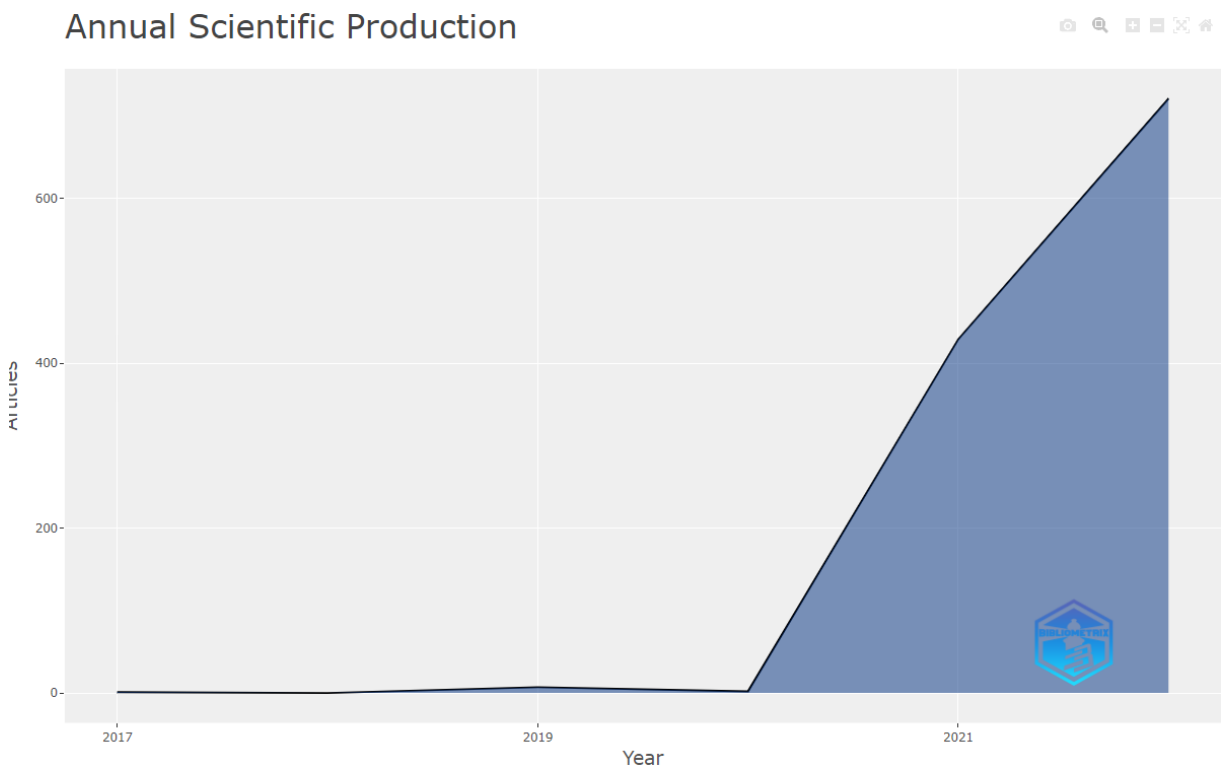


Рис. 4. Ежегодная научная продукция

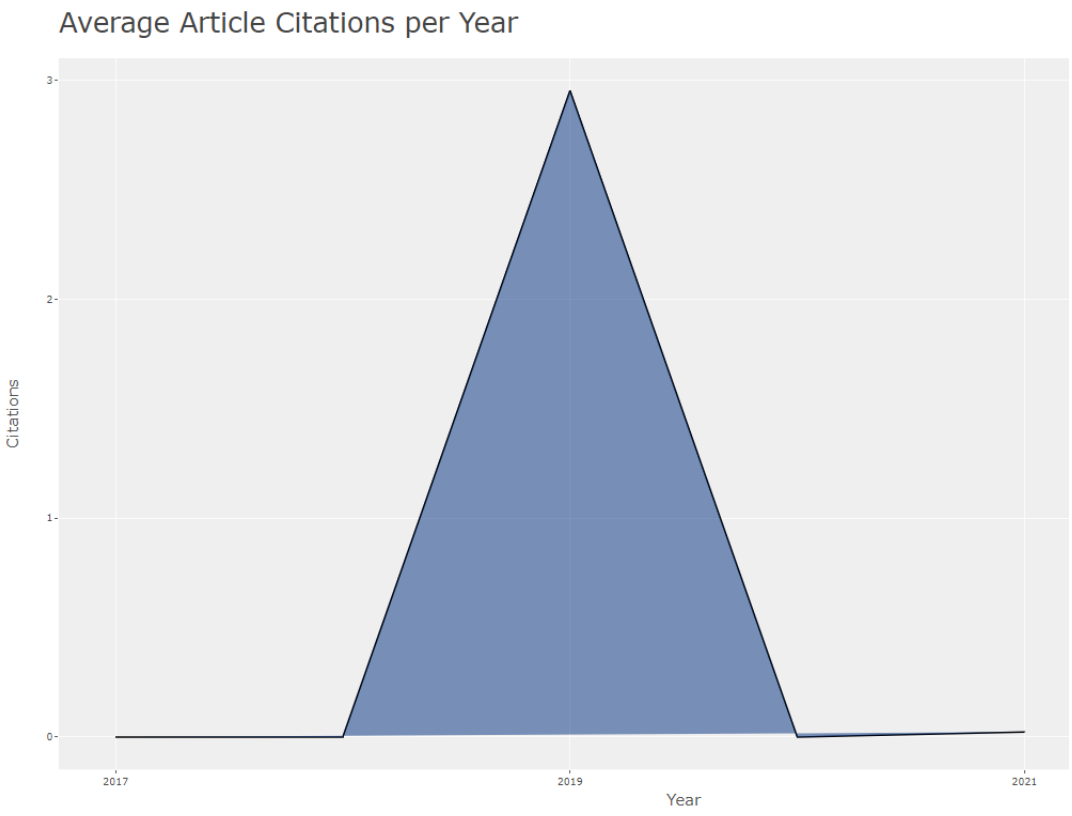


Рис. 5. Среднее количество цитирований статей в год

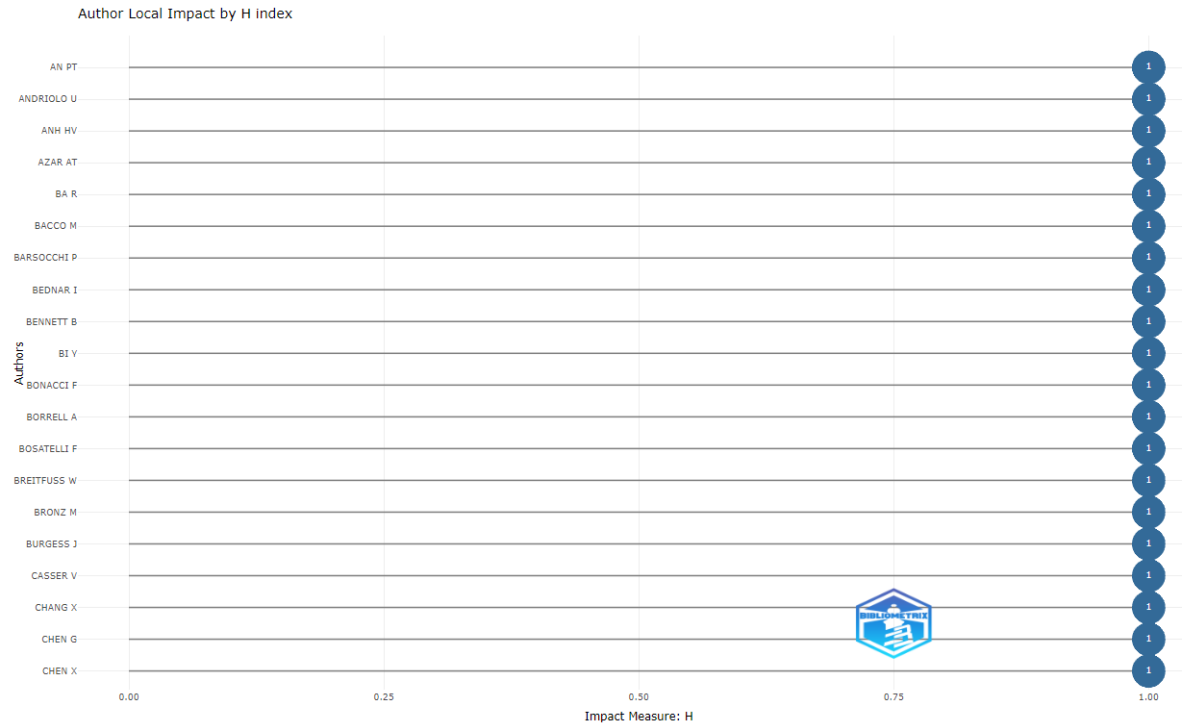


Рис. 6. Индекса Хирша

Квартиль Q1

1. Aerospace Science and Technology.
2. Drones.
3. International Journal of Engine Research.
4. Progress in Aerospace Sciences.

Квартиль Q2

1. Journal of Aerospace Information Systems.
2. Journal of Aerospace Engineering.
3. Journal of Unmanned Vehicle Systems.

Квартиль Q3

1. Advances in Aircraft and Spacecraft Science.
2. Aircraft Engineering and Aerospace Technology.
3. International Journal of Aeronautical and Space Sciences.

Квартиль Q4

1. SAE International Journal of Aerospace.
2. Journal of Spacecraft Technology.

Таблица 3

Квартиль Q1. Журнал «Aerospace Science and Technology»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,995	24	150	205	7862	1337	196	6,48	52,41

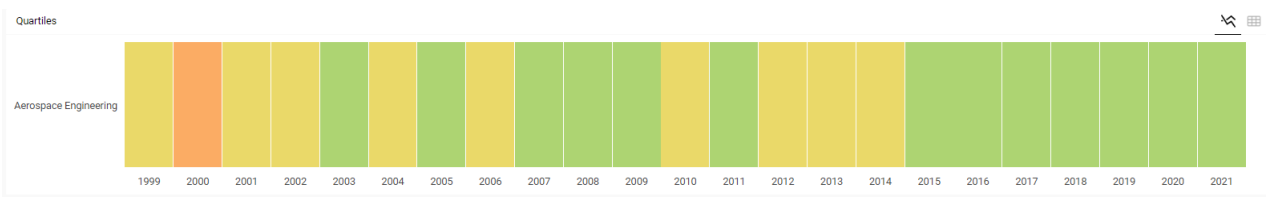


Рис. 7. Информация о журнале «Aerospace Science and Technology»

Таблица 4

Квартиль Q1. Журнал «Drones»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,995	24	150	205	7862	1337	196	6,48	52,41

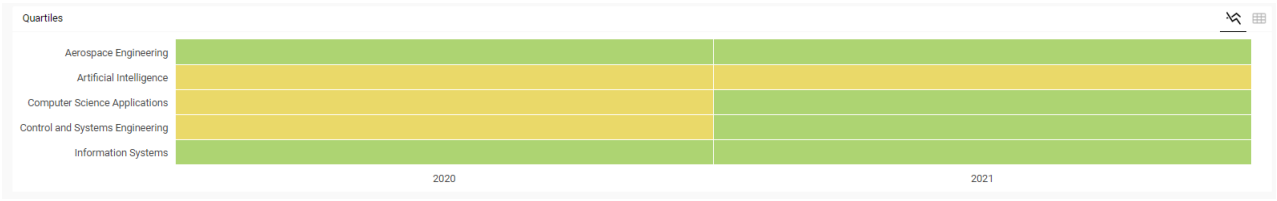


Рис. 8. Информация о журнале «Drones»

Таблица 5

Квартиль Q1. Журнал «International Journal of Engine Research»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
Journal	1,022	60	380	289	15983	1411	283	5,21	42,06

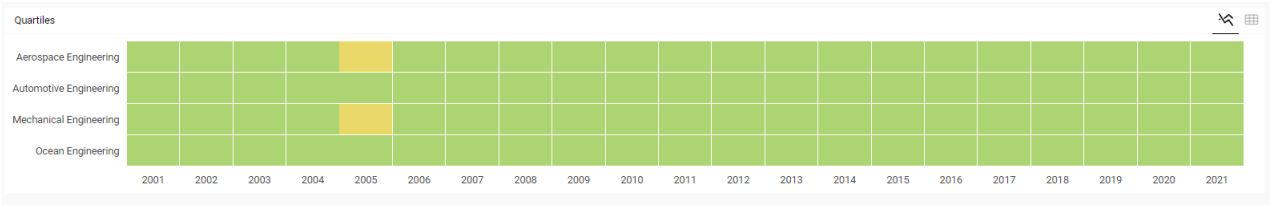


Рис. 9. Информация о журнале «International Journal of Engine Research»

Таблица 6

Квартиль Q1. Журнал «Progress in Aerospace Sciences»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	2,514	120	24	110	4975	1428	110	10,71	207,29

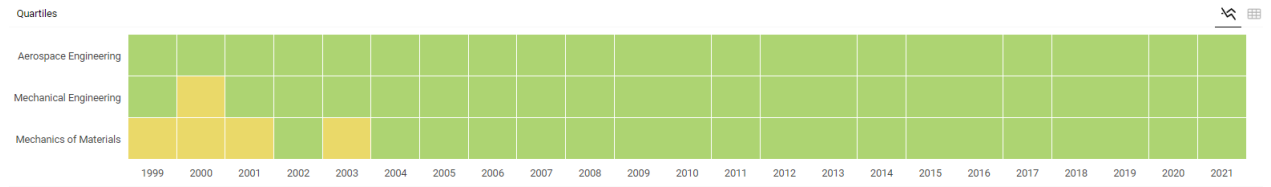


Рис. 10. Информация о журнале «Progress in Aerospace Sciences»

Таблица 7

Квартиль Q2. Журнал «Journal of Aerospace Information Systems»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,470	35	54	153	2490	311	147	1,88	46,11

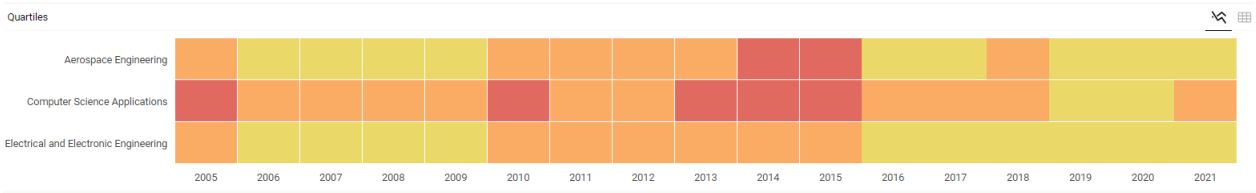


Рис. 11. Информация о журнале «Journal of Aerospace Information Systems»

Таблица 8

Квартиль Q3. Журнал «Advances in Aircraft and Spacecraft Science»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,294	13	15	99	518	105	97	1,12	34,53

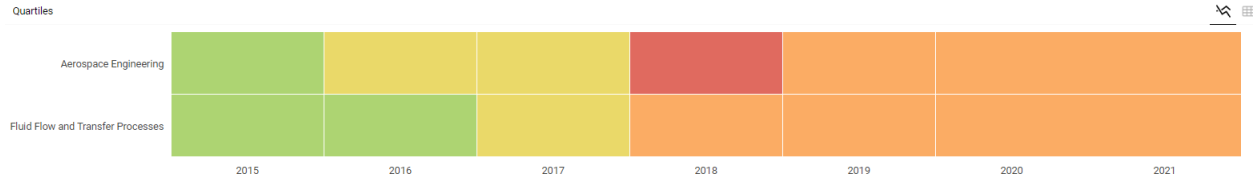


Рис. 12. Информация о журнале «Advances in Aircraft and Spacecraft Science»

Таблица 9

Квартиль Q4. Журнал «Journal of Spacecraft Technology»

Type	SJR	H index	Total Docs (2021)	Total Docs. (3 years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3 years)	Citable Docs. (3 years)	Cites/Doc. (2 yeasr)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,105	6	0	24	0	3	24	0,00	0,00

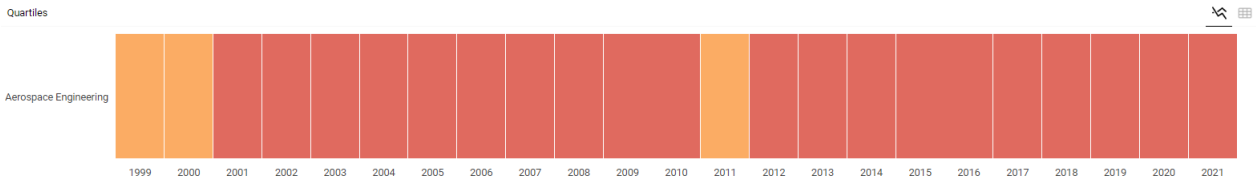


Рис. 13. Информация о журнале «Journal of Spacecraft Technology»

Вывод

По результатам исследования была определена публикационная активность, представленная в Scopus, в области исследование и выбора критериев классификации двигателей внутреннего сгорания для беспилотных летательных аппаратов.

Результатом работы в VOSviever стала наукометрическая картина из ключевых слов и авторов. Слово «Uav» встречается больше всех и упоминается 106 раз, а также имеет 311 связей с другими словами. Самым встречаемым автором является Lii Y., он написал 37 работ и на него ссылались 128 раз.

Было произведено ранжирование публикаций по значимости в рейтингах с помощью информационной системы. Наиболее высокими квартилями Q1 обладают журналы: Aerospace Science and Technology, Drones, International Journal of Engine Research Progress in Aerospace Sciences. Наиболее низким квартилем Q4 обладает журнал: Journal of Spacecraft Technology.

Полученная публикационная активность показывает, что количество публикаций в 2021 г. возросло по сравнению с 2020 г., несмотря на малоизученность темы. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что данная область является перспективной, идет увеличения интереса к тематике двигателей внутрен-

него сгорания для беспилотных авиационных систем.

Библиографический список

1. RStudio Cloud. URL: https://login.rstudio.cloud/ (дата обращения: 19.05.2022).

2. *Костин А. С., Костин А. С., Богатов Н. В.* Перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Технологии защиты. URL: http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1348&uid2 =1474&uid3=1479 (дата обращения: 20.05.2022).

3. *Костин А. С., Богатов Н. В.* Рынок беспилотных летательных аппаратов в России и мире. Современные тренды и перспективы развития // Системный анализ и логистика. Вып. № 4 (22), ISSN 2007-5687. СПб.: ГУАП, 2019. С. 65–72.

4. *Костин А. С.* Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика. Вып. № 1 (19), ISSN 2007-5687. СПб.: ГУАП. 2019. С. 70–80.

5. Scimago Journal & Country Rank. URL: https://www.scimagojr.com/ (дата обращения: 19.05.2022).

УДК 656.7.043 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-156-159**

Д. А. Елкина*
студент
А. А. Добровольская*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПАССАЖИРОВ В ТРАНСПОРТНОМ ТЕРМИНАЛЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ

В статье была построена модель перемещения пассажира внутри территории аэропорта. Кроме того, рассматривается статистика пассажирских авиаперевозок в России, обоснована необходимость создания модели перемещения пассажира, на основе схемы аэропорта Пулково. Обозначены требования к модели перемещения и описаны ее основные компоненты с помощью теории графов. Построена модель с обозначением компонент связности, с помощью которой найдены элементы наибольшего притяжения.
Ключевые слова: *пассажиропоток, аэропорт, ориентированный граф, компоненты связности.*

D. A. Elkina*
Student
A. A. Dobrovolskaya*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CREATURE A MODEL OF PASSENGER MOVEMENT IN A TRANSPORT TERMINAL BASED ON GRAPH THEORY

In the article, a model of passenger movement inside the airport was built. In addition, the statistics of passenger air transportation in Russia are considered, the necessity of creating a model of passenger movement based on the scheme of Pulkovo airport is justified. The requirements for the displacement model are outlined and its main components are described using graph theory. A model is constructed with the designation of the connectivity components, with the help of which the elements of the greatest attraction are found.
Keywords: *passenger traffic, airport, oriented graph, connectivity components.*

В сфере транспорта в России в последние годы была проведена значительная модернизация инфраструктуры, что позволило удовлетворить растущий спрос на пассажирские перевозки и создать определенный задел для дальнейшего развития. Однако, эффективная работа объектов транспортной инфраструктуры возможна только в случае своевременного реагирования на изменения ее текущего состояния. В данном случае – отслеживать происходящие изменения в реальном времени, что дает возможность принимать необходимые меры.

Пассажирская авиация в настоящее время занимает все большую долю среди видов транспорта благодаря скорости и комфорту. Несмотря на воздействие COVID-19, в 2021 году пассажиропоток авиакомпаний России вырос на 62%: российские авиакомпании перевезли 112 млн пассажиров [1] против 69,2 млн годом ранее, когда перелеты были существенно ограничены. Пассажиропоток аэропорта Пулково за 8 месяцев 2022 года составил 11,9 млн пассажиров [2]. Этот показатель превышает пассажиропоток за аналогичный период 2021 года, равный 11,6 млн человек. Масштаб терминалов аэропорта быстро растет с развитием индустрии авиаперевозок. Современный терминал как правило представляет собой комплексный транспортный узел, объединяющий различные функции: перевозка пассажиров и багажа, транзит, коммерческая деятельность.

Таким образом, постепенно увеличивающийся масштаб терминалов и воздействие факторов неопределенности вызывают необходимость создания универсальной модели перемещения пассажира внутри аэропорта для:

– удовлетворения потребностей пассажиров в авиаперевозке без задержек;

– предоставление дополнительных услуг, сопутствующих авиаперевозке;
– исключение встречности и пересечения основных пассажиропотоков;
– создания удобной среды для перемещения;
– удовлетворение базовых потребностей пассажира;
– получения коммерческой эффективности деятельности аэропорта;
– обеспечение безопасности.

Целью исследования является построение универсальной математической модели пассажиропотока в аэропорту Пулково, определение ключевых мест притяжения. Математическая модель может стать как инструментом оценки эффективности текущих маршрутов внутри терминала, так и управления в условиях неопределенности.

План аэропорта Пулково

Аэропорт на сегодняшний день состоит из двух зданий [3]. В новом здании сосредоточены практически все воздушные службы, через него происходит вход и выход пассажиров, производится посадка на международные рейсы. Историческое здание, которое было реконструировано, используется как «чистая зона» для вылета внутренних рейсов. Между собой постройки соединены галереей. На территории расположены две взлетно-посадочные полосы. Для стоянки судов отведено свыше 100 мест.

Кроме главного здания и взлетных, посадочных полос на территории можно найти (рис. 1):
– Парковочные зоны.
– Гостиничный комплекс.
– Остановки общественного транспорта.
– Зоны общественного питания.
– Кассы.
– Стойки регистрации.
– Зоны таможенного и паспортного контроля, предполетного досмотра.
– Стойки для оформления TaxFree.
– Бизнес-залы.
– Банкоматы.
– Залы ожидания.
– Кафе, рестораны и магазины.
– Туалеты и пеленальные комнаты.

И соответственно выходы на посадку расположены с правой и левой стороны от центрального вестибюля этажа. Таким образом, внутри терминала пассажиры движутся по четкой логической схеме [4] (рис. 2).

Представим существующую схему перемещения пассажира в виде ориентированного графа (рис. 3). Ориентированный граф G можно опре-

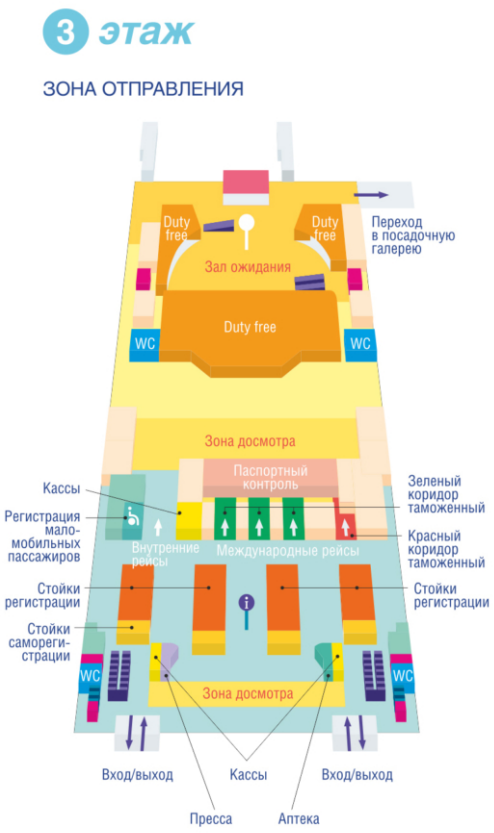


Рис. 1. План третьего этажа аэропорта Пулково

делить как совокупность $G = (V, U)$, где $V = \{v_1, \ldots, v_n\}$ – множество вершин графа, а $U \subset V \times V$ – конечное подмножество упорядоченного (декартова) произведения $V \times V$, образующее множество дуг графа [3].

Стоит заметить, что граф (рис. 3) отображает только базовые процессы пассажира, следующего на посадку. В реальности сопровождающих процессов больше, а взаимодействия между ними намного сложнее (рис. 4).

В исследовании каждой дуге u поставлено в соответствие физическое значение – длина дуги $L(u)>0$. В зависимости от конкретной задачи, это число может быть мерой физического расстояния, времени, стоимости или другого важного параметра. В нашем случае, мы можем рассмотреть процесс с двух сторон: с точки зрения пассажира (табл. 1) – длиной дуги будет выступать время, затраченное на каждой дуге или пройденное расстояние, с точки зрения аэропорта параметром дуги может выступать стоимость – получение максимальной прибыли от пребывания пассажира в аэропорту.

Поскольку модель перемещения пассажира внутри аэропорта является сложной системой,

Рис. 2. Схема перемещения пассажира в аэровокзальном комплексе

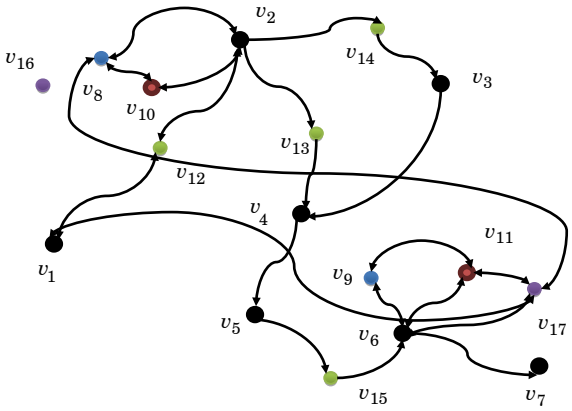


Рис. 4. Полный ориентированный граф пассажиропотока в аэропорту: синие (v_8, v_9) – туалеты; красные (v_{10}, v_{11}) – вода, питание; зеленые (v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}) – информационное сопровождение (стойки информации, указатели, электронные табло), фиолетовые (v_{16}, v_{17}) – покупка иных товаров

Таблица 1

Матрица перемещения пассажира в аэропорту

	v_1	v_2	…	v_n
v_1	t_{11}	t_{12}		t_{1n}
v_2	t_{21}	t_{22}		t_{2n}
v_n	t_{n1}	t_{n2}		t_{nn}

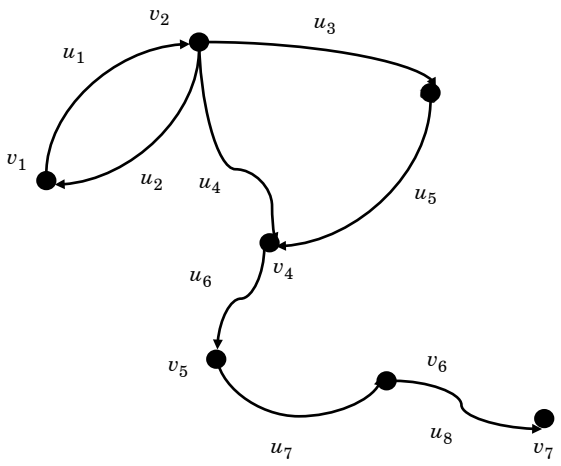


Рис. 3. Ориентированный граф пассажиропотока в аэропорту: v_1 – вход, первичный досмотр пассажира и багажа; v_2 – регистрация на рейс; v_3 – фитосанитарный контроль (для пассажиров с животными); v_4 – паспортный контроль; v_5 – досмотр пассажиров и багажа; v_6 – терминал; v_7 – выход на посадку; u_1, u_2, …, u_8 – перемещения пассажира на рассмотренном примере

возникает задача выбора наиболее эффективного или наиболее предпочтительного варианта. Эффективность системы при этом оценивается набором разных критериев, так как оценивается с помощью частных показателей ее функционирования.

Разделим граф перемещения пассажира на компоненты связности [5] или контуры объектов (рис. 5). Метод поиска компонентов связности состоит в разложении графа на классы эквивалентностей:

$$K(v_i) = \hat{\Gamma} v_i \cap \hat{\Gamma}^{-1} v_i,$$

где $K(v_i)$ – класс, содержащий вершину v_i, $\hat{\Gamma} v_i$ и $\hat{\Gamma}^{-1} v_i$ – транзитивное и обратное транзитивное замыкание для вершины v.

Таким образом, контур для v_i – подмножество вершин, образуемое множеством транзитивного и обратного транзитивного замыкания для вершины v_i.

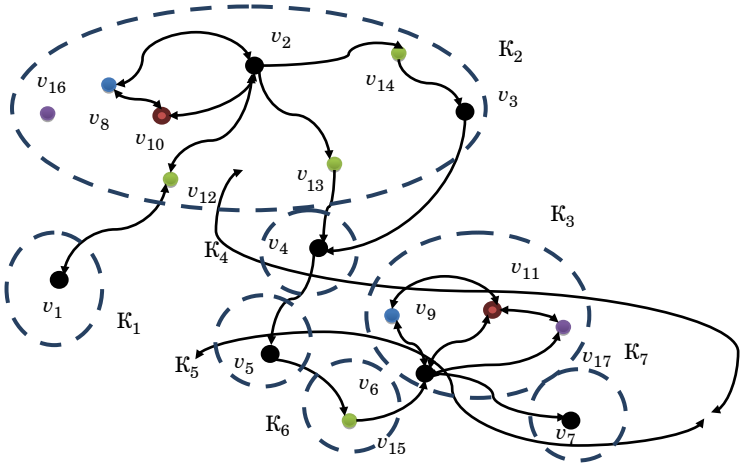


Рис. 5. Граф, разложенный на максимально сильно связанные подграфы (контуры); граф классов эквивалентов объектов

Заключение

Пассажирские авиаперевозки с каждым годом увеличиваются в объемах, что вызывает необходимость эффективного регулирования, в том числе и пассажиропотока внутри терминала. Использование представленных дискретных моделей позволило реализовать модель движения пассажиропотока внутри аэровокзала. Был построен ориентированный граф как в упрощенном и в более сложном виде, который отображает путь от входа на территорию аэропорта до посадки в самолет. С помощью построенной модели можно спрогнозировать нагрузку на той или иной дуге. Кроме того, была построена модель, разложенная на компоненты связности, на которых можно определить элементы наибольшего притяжения.

Библиографический список

1. Пассажирские авиаперевозки. URL: https://goo.su/IjME (дата обращения: 12.12.2022).

2. Пассажиропоток Пулково. URL: https://goo.su/hVBJ (дата обращения: 12.12.2022).

3. Схема аэропорта Пулково. URL: https://pulkovoairport.ru/passengers/map/ (дата обращения: 13.11.2022).

4. *Фетисов В. А., Майоров Н. Н.* Метод оценки пропускной способности аэровокзального комплекса с помощью имитационного моделирования // Моделирование систем и процессов. СПб.: ГУАП, 2014. 5 с.

5. *Прокушев Л. А.* Дискретная математика (основы теории графов и алгоритмизации задач): учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2000. 82 с.

6. Поиск компонент сильной связности. URL: https://habr.com/ru/post/331904/ (дата обращения: 13.11.2022).

УДК 656.025.4

П. Н. Ерофеевская*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ДОРОЖНОГО БИТУМА ИЗ ЯРОСЛАВЛЯ (РФ) В СОФИЮ (БОЛГАРИЯ)

В статье рассматривается вопрос организации транспортировки дорожного битума. Определяются способы перевозки груза, производится подбор специализированного подвижного состава, проводится подробный анализ условий, необходимых для транспортировки дорожного битума на железнодорожном, автомобильном, морском и речном транспорте. Как итог, выбирается наиболее оптимальный и предпочтительный вариант транспортировки путем сравнения коммерческой работы по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *дорожный битум, опасный груз, специализированный подвижной состав, организация и технология транспортировки, стоимость и время перевозки.*

P. N. Erofeevskaya*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF ROAD BITUMEN FROM YAROSLAVL (RUSSIAN FEDERATION) TO SOFIA (BULGARIA)

The article deals with the organization of transportation of road bitumen. The methods of cargo transportation are determined, specialized rolling stock is selected, a detailed analysis of the conditions necessary for the transportation of road bitumen by rail, road, sea and river transport is carried out. As a result, the most optimal and preferred transportation option is selected by comparing commercial work on transportation routes.
Keywords: *road bitumen, dangerous cargo, specialized rolling stock, organization and technology of transportation, cost and time of transportation.*

Введение

Битум – продукт, который требуется дорожно-строительным организациям и предприятиям для изготовления асфальта максимально быстро и оперативно. Ввиду этого, его транспортировка достаточно востребована.

Нефтеперерабатывающая промышленность занимает важную роль в Российской индустрии. На сегодняшний день природные энергетические ресурсы оказывают значительное влияние на экономическое положение страны и на темпы ее развития.

В свою очередь, Болгария уделяет особое внимание развитию и формированию первоклассной автодорожной инфраструктуры. В основном ориентируясь на ремонт автомобильных дорог и расширение строительства транспортной дорожной сети. При этом страна не обладает достаточными нефтебитумными ресурсами, следовательно, разработка предложений по организации транспортировки дорожного битума в Болгарию представляется весьма актуальной.

Обоснование вида транспорта и транспортных средств

Битум – специфический груз. При его транспортировке следует предусматривать особенности данного груза как материала, владеющего повышенной степенью вязкости, воспламеняемостью и взрывоопасностью, значительной ис-

паряемостью, токсичностью, а также оказывающего коррозионное влияние.

В статье рассматривается организация транспортировки дорожного битума из Ярославля (Российская Федерация) в Софию (Республика Болгария) тремя маршрутами:

1. Мультимодальная перевозка железнодорожным и морским транспортом.

2. Мультимодальная перевозка речным, морским и автомобильным транспортом.

3. Мультимодальная перевозка железнодорожным, морским и автомобильным транспортом.

Следовательно, для осуществления перевозки по данным маршрутам будет использован следующий подвижной состав.

При транспортировке по маршруту № 1 будет использована 4-осная цистерна модели 15-1566-07 для перевозки вязких нефтепродуктов и битума, а также российское морское грузовое судно типа Ro-Ro «CONRO TRADER». Подвижной состав представлен на рис. 1. Его технические характеристики приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

При транспортировке по маршруту № 2 будет использовано российское сухогрузное судно «Русич» класса река-море, а также седельный тягач IVECO Stralis с тентованным полуприцепом KRONE SDP 27. Они представлены на рис. 2. Их технические характеристики приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

При транспортировке по маршруту № 3 будет использован 4-осный вагон бункерного типа для нефтебитума модели 17-494, а также российское танкерное судно «ВФ Танкер IMO2» и седельный тягач IVECO Stralis с полуприцепом битумовозом марки ППЦБ-33. Все они представлены на рис. 3. А их технические характеристики приведены в табл. 5, 6 и 7 соответственно.

Рис. 1. Транспорт для перевозки дорожного битума по маршруту № 1

Таблица 1

Технические характеристики 4-осной цистерны модели 15-1566-07

Параметр	Значение
Грузоподъемность, т	65
Объем котла, м^3	71,7
Скорость конструкционная, км/ч	120
Длина по осям сцепления автосцепок, мм:	12020
Габарит	02-ВМ

Таблица 2

Технические характеристики судна CONRO TRADER

Параметр	Значение
Класс	KM* L3 R2 Ro-Ro Cargo Ship
Размеры (д/ш/в), м	109,04/21,57/7,7
Осадка наибольшая, м	4,25
Дедвейт, т	4533
Валовая вместимость, рег. т.	3998
Эксплуатационная скорость, узлы	10,0
Количество палуб	2
Количество принимаемого подвижного состава (грузовые вагоны/ж.д. цистерны)	28/35

Рис. 2. Транспорт для перевозки дорожного битума по маршруту № 2

Таблица 3

Технические характеристики сухогрузного судна «Русич»

Параметр	Значение
Класс	КМ(*) Ice2 [1] R1 AUT1
Размеры (д/ш/в), м	128,2/16,74/6,1
Осадка (в море/в реке), м	4,34/3,60
Дедвейт (в море/в реке), т	5485/3885
Эксплуатационная скорость, узлы	11
Количество грузовых трюмов	3
Размеры всех трех трюмов, м	26,98x12,6x8
Объем грузового трюма, $м^3$	8125

Таблица 4

Технические характеристики тентованного полуприцепа KRONE SDP 27

Параметр	Значение
Размеры полуприцепа (д/ш/в), мм	13620/2480/2650
Объем, $м^3$	92
Собственная масса, кг	6190
Грузоподъемность, кг	32810
Разрешенная MAX масса, кг	39000
Нагрузка на ССУ тягача, кг	12000
Нагрузка на оси, кг	27000
Источник: https://www.gl-pno.ru/producer/krone/tehnich-eskie-harakteristiki-polupricepa-krone-sdp-27-elub-cs/ (любое использование материалов допускается только при наличии гиперссылки).	

Рис. 3. Транспорт для перевозки дорожного битума по маршруту № 3

Таблица 5

Технические характеристики 4-осного вагон бункерного типа модели 17-494

Параметр	Значение
Грузоподъемность, т	45,0
Объем, м^3	46,0
Конструкционная скорость, км/ч	120
Количество бункеров	4
Объем бункера полезный, м^3	11,6
Длина по осям автосцепок, мм	14620
Габарит по ГОСТ 9238-2013	1-ВМ

Таблица 6

Технические характеристики танкерного судна «ВФ Танкер IMO2»

Параметр	Значение
Класс	KM* Ice1 R2 AUT1-ICS OMBO VCS ECO-S Oil/Chemical tanker type 2
Размеры (д/ш/в), м	140,85/16,7/6,0
Осадка (в море/в реке), м	4,20/3,60
Дедвейт (в море/в реке), т	7022/5617
Эксплуатационная скорость, узлы	не менее 10
Количество танков (грузовых/отстойных)	8 (6/2)
Объем грузовых танков (включая отстойные танки), м^3	8357 (289)

Таблица 7

Технические характеристики битумовоза модели ППЦМ-33

Параметр	Значение
Объем, м3	33
Масса снаряженная полуприцепа-цистерны, кг, не более	10000
Грузоподъемность не более, кг	33000
Нагрузка на седельно-сцепное устройство, кг, не более	15500
Высота седельно-сцепного устройства, мм	1200 ± 50
Габаритные размеры (длина/ширина/высота)	11240/2500/3845

Рис. 4. Расположение маркировки на транспортном средстве и транспортной таре при перевозке битума

Транспортная маркировка груза

Битум дорожный относится к 9-му классу транспортной опасности, поэтому при его перевозке транспортное средство и транспортная тара должна быть обеспечена нанесением маркировки, согласно правилам, приведенным в ГОСТ 1510 [1, 2].

На специализированных транспортных средствах должна быть нанесена следующая информация: знак опасности груза (9 класс, подкласс 9.1), номер ООН (3257), номер аварийной карточки (99), классификационный трафарет – «Битум» или «Вязкие нефтепродукты», дополнительные манипуляционные знаки, такие как «Вещество, перевозимое при повышенной температуре» и «Вещество, опасное для окружающей среды».

При перевозке в тарно-бочковой упаковке, на транспортной таре должны быть нанесены манипуляционные знаки, такие как: «Груз следует защищать от солнечных лучей», «Необходимость защиты груза от воздействия влаги», «Правильное вертикальное положение груза», «Максимальная нагрузка при штабелировании, допустимая для размещения на транспортной упаковке». [3, 4, 5]

Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального варианта транспортировки дорожного битума необходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки.

Описание маршрута № 1: Ярославль – порт Севастополь железнодорожным транспортом; порт Севастополь – порт Варна морским транспортом; порт Варна – София железнодорожным транспортом. Общая протяженность маршрута составляет 3352 км.

Описание маршрута № 2: порт Ярославль – порт Ростов-на-Дону речным транспортом; порт Ростов-на-Дону – порт Варна морским транспортом; порт Варна – София автомобильным транспортом. Общая протяженность маршрута составляет 4134 км.

Описание маршрута № 3: Ярославль – порт Новороссийск железнодорожным транспортом; порт Новороссийск – порт Варна морским транспортом; порт Варна – София автомобильным транспортом. Общая протяженность маршрута составляет 3105 км.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Расчет стоимости перевозки на железнодорожном транспорте проводился согласно тарифам, прописанным в Прейскуранте № 10-01, МТТ и СМГС. [6, 7, 8]

Расчет стоимости перевозки на автомобильном транспорте осуществлялся согласно тарифным ставкам, прописанным в Прейскуранте № 13-01-01, а при перевозке морским и речным транспортом по тарифам Прейскуранта № 14-01, а также на основе – базовой ставки фрахта, ставки за стоянку, стоимости хода судна, стоимости ПРР, расходов на оформление документации, портовых сборов, и различных видов надбавок. [9, 10]

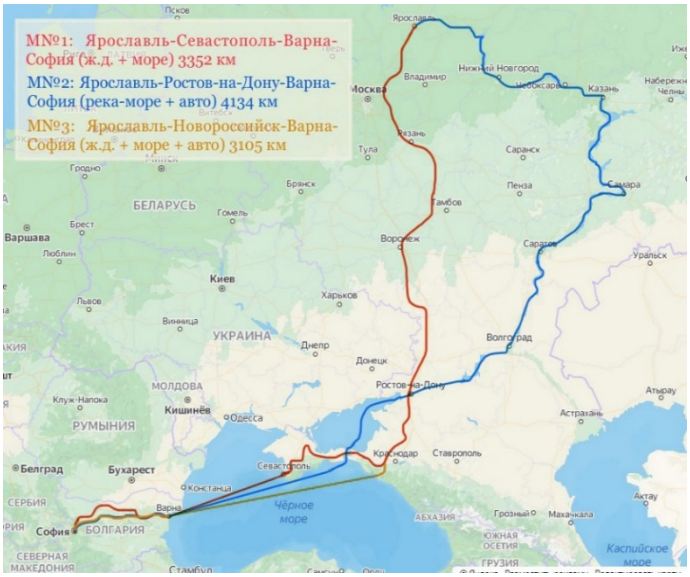


Рис. 5. Общая схема маршрутов перевозки битума

Таблица 8

Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок

№ маршрута	Подробности маршрута	Вид подвижного состава, количество	Расстояние, км	Время перевозки сутки	Стоимость, руб./год	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (ж.д, море, ж.д)	№ 1а Ярославль – порт Севастополь	4-осная цистерна модели 15-1566-07, 4	3352	6,89	16135643,6	0,83
	№ 1б порт Севастополь – порт Варна	Судно-паром «CONRO TRADER», 1				
	№ 1в Варна – София	4-осная цистерна модели 15-1566-07, 2				
№ 2 (река-море, авто)	№ 2а Порт Ярославль – порт Ростов-на-Дону	Сухогрузное судно «Русич», 1	4134	8,81	20025920,1	1,03
	№ 2б порт Ростов-на-Дону – порт Варна	Сухогрузное судно «Русич», 1				
	№ 2в порт Варна – София	Тентованный полуприцеп KRONE SDP 27 + Седельный тягач IVECO Stralis, 4/3				
№ 3 (ж.д., море, авто)	№ 3а Ярославль – порт Новороссийск	4-осный вагон бункерного типа модели 17-494, 2/4	3105	5,96	78506108,0	4,04
	№ 3б порт Новороссийск – порт Варна	Судно «ВФ Танкер IMO2», 1				
	№ 3 в порт Варна – София	Битумовоз ППЦМ-33 + Седельный тягач IVECO Stralis, 4				

Определение времени на транспортирование определяется исходя из протяженности маршрута и скорости перевозки (на железнодорожном транспорте – 600 км/сутки, на автомобильном – 50 км/ч, на морском-речном варьируется в пределах 11-14 узлов), а также на продолжительность перевозки влияет время на ПРР и время на переоформление документов.

Итоговые стоимость и время доставки по маршрутам

Маршрут № 1:

Протяженность маршрута: 2326 (ж.д.) + 494 (море) + 532 (ж.д.) = 3352 км.

Общее время на транспортировку: 4,21 (ж.д.) + 1,46 (море) + 1,22 (ж.д.) = 6,89 сут.

Годовая стоимость маршрута составит 16135643,6 руб./год.

Маршрут № 2:

Протяженность маршрута: 2602 км (река) + 1090 км (море) + 442 км (авто) = 4134 км.

Общее время на транспортировку: 8,05 (река-море) + 0,760 (авто) = 8,81 сут.

Годовая стоимость маршрута составит: 20025920,1 руб./год.

Маршрут № 3:

Протяженность маршрута: 1833 км (ж.д.) + 830 км (море) + 442 км (авто) = 3105 км.

Общее время на транспортировку: 3,31 (ж.д.) + 1,765 (море) + 0,885 (авто) = 5,96 сут.

Годовая стоимость маршрута составит 78506108,0 руб./год.

Выбор наиболее оптимального маршрута определяется на основании стоимостных и временных показателей, а также по показателю R_n.

Данные показатели по маршрутам R_n определяются по формуле [11]:

$$R_n = E_n / C, \quad (1)$$

где R_n – коэффициент отношения стоимости перевозки к стоимости груза; E_n – суммарная годовая стоимость перевозки на n маршруте, руб.; C – годовая стоимость перевезенного груза, руб.

Стоимость 1 т дорожного битума марки БНД 100/130 составляет 13490 руб. Тогда общая годовая стоимость будет равна 1440 · 13490 = 19425600 руб. Результаты анализа всех маршрутов по стоимостным и временным показателям представлены в табл. 8.

Анализ показателей перевозки на маршрутах

Маршрут № 3 с участием железнодорожного, морского и автомобильного транспорта требует больших экономических затрат по сравнению с двумя другими. Это обусловлено использованием специализированного битумного полувагона и цистерны-битумовоза. Таким образом, выбор этого маршрута нерационален.

Маршрут № 2 почти в четыре раза меньше по стоимости по сравнению с маршрутом № 3, но минус его в том, что он является самым длительным среди двух других. Это обусловлено значительным использованием морского-речного транспорта на большей части маршрута, с учетом того, что по воде судно перемещается достаточно долго.

Маршрут № 1 – маршрут мультимодальной перевозки является самым оптимальным как по стоимости, так и по времени. Так как большая часть маршрута выполняется железнодорожным транспортом, а при перевозке по морю железнодорожная цистерна вместе с грузом перемещается на пароме, это значительно снижает время на погрузо-разгрузочные работы не требует совершения дополнительных маневров, например, как с бочками и перегрузкой битума наливом с одного на другой вид транспорта.

Заключение

В данной статье были описаны основные транспортные характеристики дорожного битума, степень опасности груза и маркировка. Также был подобран специализированный железнодорожный, автомобильный, морской и речной транспорт.

Главной задачей стояло – организовать перевозку дорожного битума из Ярославля в Софию (Болгария) с годовым объемом поставки 1440 т. В качестве маршрутов было рассмотрено три мультимодальные перевозки, в результате был выбран оптимальный – Маршрут № 1 (Ярославль – Севастополь – Варна – София), осуществляемый с помощью железнодорожной 4-осной цистерны модели 15-1566-07 для перевозки вязких нефтепродуктов и битума в количестве двух единиц в месяц и грузовым судном-паромом «CONRO TRADER». Годовая стоимость составила 16 135 643,6 рублей, а время на транспортировку одной партии 6,89 суток.

Библиографический список

1. ГОСТ 22245-90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. Группа Б43 Межгосударственный стандарт. МКС 75.140. ОКП 02 5612. Дата введения 1990-01-01.

2. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. Группа Т00 Межгосударственный стандарт. МКС 01.040.13. ОКСТУ 0079. Дата введения 1990-01-01.

3. ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов. Группа Д79 Межгосударственный стандарт. МКС 55.200. ОКСТУ 0079. Дата введения 1990-01-01.

4. ГОСТ 1510-84. Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. Группа Б09 Межгосударственный стандарт. МКС 75.080. ОКСТУ 0208. Дата введения 1986-01-01.

5. ГОСТ 13950-91 Бочки стальные сварные и закатные с гофрами на корпусе. Межгосударственный стандарт. Группа Д82. Технические условия. ОКП 14 1511, ОКП 14 1512, ОКП 14 1513, ОКП 14 1521, ОКП 14 1522, ОКП 14 1524. Дата введения 1993-01-01.

6. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Части 1, 2. М.: ПФ «Красный Пролетарий», 2003. (с изменениями на 31 января 2017 г.).

7. Международный железнодорожный транзитный тариф (МТТ). URL: https://base.garant.ru/12176661/# (дата обращения: 28.10.2022).

8. Соглашение о Международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) URL: https://docs.cntd.ru/document/1901924 (дата обращения: 28.10.2022).

9. Расчет тонно-километров онлайн калькулятор. URL: https://www.center-pss.ru/math/tonno-kilometri.htm (дата обращения: 28.10.2022).

10. Международный фрахтовый брокер – сервисы для транспортных компаний, ставки фрахта, трекинг контейнеров, контейнерные перевозки. URL: https://www.searates.com (дата обращения: 29.10.2022).

11. *Уголков С. В.* Особенности организации перевозки живой рыбы // Системный анализ и логистика. Вып. № 3 (21), ISSN 2077-5687. СПб.: ГУАП., 2019. С. 45–53.

УДК 656.075 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-167-173**

В. В. Зеленцова*
магистрант
Н. А. Слободчиков*
кандидат военных наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СЕРВИС «МОБИЛЬНОСТЬ КАК УСЛУГА» – ОДИН ИЗ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

В данной статье рассматривается один из возможных вариантов решения проблемы загруженности улично-дорожной сети в условиях высокого уровня автомобилизации городов. Описана концепция сервиса «Мобильность как услуга» в качестве одного из прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками. Рассмотрены технологии, позволяющие работать данному сервису, при этом повышая эффективность использования транспортных средств. Проведен анализ сервисов каршеринг, кикшеринг и байкшеринг как системы транспорта «первой и последней мили».
Ключевые слова: *мобильность как услуга, городской транспорт, общественный транспорт, система проката, каршеринг, кикшэринг, байкшеринг, транспорт первой и последней мили.*

V. V. Zelentsowa*
Postgraduate Student
N. A Slobodchikov*
PhD, Military, Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE «MOBILITY AS A SERVICE» SERVICE AS ONE OF THE PROGRESSIVE METHODS OF URBAN TRAFFIC MANAGEMENT

This article discusses one of the possible solutions to the problem of congestion of the road network in conditions of a high level of motorization of cities. The concept of the service "Mobility as a service" as one of the progressive methods of urban traffic management is described. The technologies that allow this service to work, while increasing the efficiency of using vehicles, are considered. The analysis of carsharing, kicksharing and bikesharing services, as a "first and last mile" transport system is carried out.
Keywords: *mobility as a service, urban transport, public transport, rental system, carsharing, kisharing, bikesharing, first and last mile transport.*

Введение

Высокие темпы развития транспортной мобильности населения в современных городах по всему миру поставили перед обществом серьезную проблему: в первую очередь это ухудшение экологической обстановки, во-вторых перегруженность улично-дорожной сети и как следствие снижение скорости движения, в-третьих – повышение затрат, связанных с транспортировкой пассажиров.

Все человечество стремиться решить эту проблему различными способами, из возможных вариантов решения данной проблемы можно отметить, что наиболее эффективным решением является внедрение прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками. Одним из таких методов является реализация в городской среде сервиса «Мобильность как услуга», который подразумевает под собой возможность оперативного выбора различных видов транспорта для поездок, и способствующий отказу людей от использования личного автомобиля в городах.

Сервис «Мобильность как услуга» – это прежде всего интеграция различных форм транспортных услуг в «Единую услугу мобильности», доступную по запросу клиента. В укрупненном виде принципиальную структуру сервиса «Мобильность как услуга» можно представить в следующем виде (рис. 1) [1].

Как видно из рисунка сервис «Мобильность как услуга» подразумевает изменение формы

Рис. 1. Структура сервиса «Мобильность как услуга»

владения транспортным средством, другими словами, одно транспортное средство должно обслужить как можно большее количество людей. Дальше будут описаны концепции, позволяющие работать данному сервису и повышать эффективность использования транспортных средств.

Каршеринг

Каршеринг (англ. Carsharing – дословно переводится как «обмен автомобилями») – термин, отражающий суть современного подхода к использованию автомобиля. Он относится к формирующемуся классу «услуг мобильности», которые используют современные технологии для обеспечения доступа к мобильности использованием автомобиля без владения потребителем личным транспортным средством. Он выступает как логическое добавление к традиционным способам обеспечения потребности людей в перевозки, такие как такси и традиционный прокат автомобилей. Основное их отличие от каршеринга – это отсутствие необходимости в современных информационных и коммуникационных технологий для коммерческой жизнеспособности, в тоже время они так же используют новые технологии для улучшения обслуживания клиентов [2].

На сегодняшний день в России каршерингом пользуются более 50 000 водителей, суммарное количество автомобилей, задействованное в бизнесе около 5000, оно постоянно растет. Автопарк состоит из нескольких десятков тысяч транспортных средств.

Услуга каршеринг обычно предполагает доступ к автомобилю, принадлежащему другому физическому или юридическому лицу, за фиксированную стоимость. В течение пользования услугами «carsha-ring», пользователь при этом несет ответственность за автомобиль и его состояние.

Данная услуга на территории России пользуется большой популярностью, поэтому в 2021 г. Центр организации дорожного движения Москвы провел исследование системы каршеринга в Москве на 2021 г. для получения качественной и количественной оценки данного сервиса [3].

В результате его проведения были получены данные, которые показали, что в 2021 г. москвичи пользовались услугами каршеринга 49 млн раз, что в среднем составляет 135 тыс. поездок за день. Для сравнения, в 2021 г. метро воспользовались 2,1 млрд раз, такси – 328 млн раз, а прокатными самокатами и велосипедами – 13,3 млн раз. На рис. 2 представлена диаграмма распределения среднего количества поездок в день.

Как видно из диаграммы наибольший спрос на услуги каршеринга наблюдается в субботу на протяжении всего года, это объясняется тем, что у большего количества пользователей в этот день выходной поездки совершались для личных дел. При этом наименьший спрос наблюдался по четвергам и понедельникам, это обусловлено тем, что в будни дни пользователи предпочитали использовать общественный транспорт.

Рис. 2. Диаграмма распределения поездок

При анализе распределения поездок по месяцам были получены данные, показывающие, что наибольший рост спроса на услуги каршеринга наблюдается в летние месяцы, это обусловлено увеличением пользователей в период отпусков. Наименьший спрос при этом приходится на зимние месяцы года, причиной этого может быть использование общественного транспорта, как более безопасной альтернативы передвижение, не зависящий от погодно-климатических условий. Данную закономерность можно посмотреть на рис. 3, на котором изображена диаграмма распределения количества поездок по месяцам года.

Разница между рабочими и нерабочими днями недели особенно заметна по утренним и дневным показателям. В выходные в утренний час пик, количество поездок значительно ниже, чем количество поездок в будни с 5 до 9 часов, при этом в рабочие дни меньше заказов днем – в это время пользователи сервиса на работе или на учебе. Наибольший спрос на пользование услуг каршеринга приходится на утренний и вечерний часы пик в будние дни, в это время пользователи совершают 33% поездок, при этом среднее расстояние поездки на каршеринге – 16 км, а среднее время аренды машины – 54 минуты с момента бронирования в приложении. На рис. 4 представлена диаграмма распределения доли поездок на каршеринге по времени суток.

Полученные результаты анализа позволяют констатировать, что наблюдается положительная тенденция к значительному увеличению использования услуг каршеринга, в первую очередь, рост спроса на услуги может быть связан с тем, что владеть своим автомобилем становится значительно дороже из-за увеличившихся издержек на ремонт и обслуживание, оплату парковок в результате чего, содержание личного автомобиля становится не только просто не выгодно, а наоборот обременительно.

Кикшеринг

Еще одним быстро развивающимся способом удовлетворения потребности в передвижении для населения является *кикшеринг* (англ. kick-sharing – дословно переводится как «совместное использование самокатов»), который подразумевает краткосрочную аренду самокатов и электросамокатов по аналогии с каршерингом.

В мире сложилась тенденция, когда, пользователи перестали воспринимать самокаты как просто развлечение, а стали воспринимать как

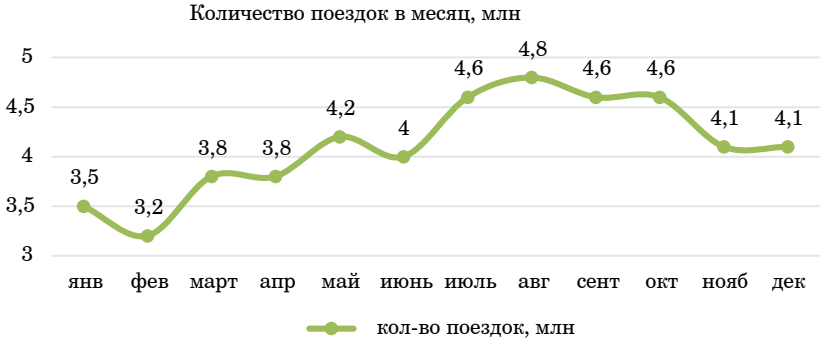


Рис. 3. Диаграмма распределения количества поездок по месяцам года

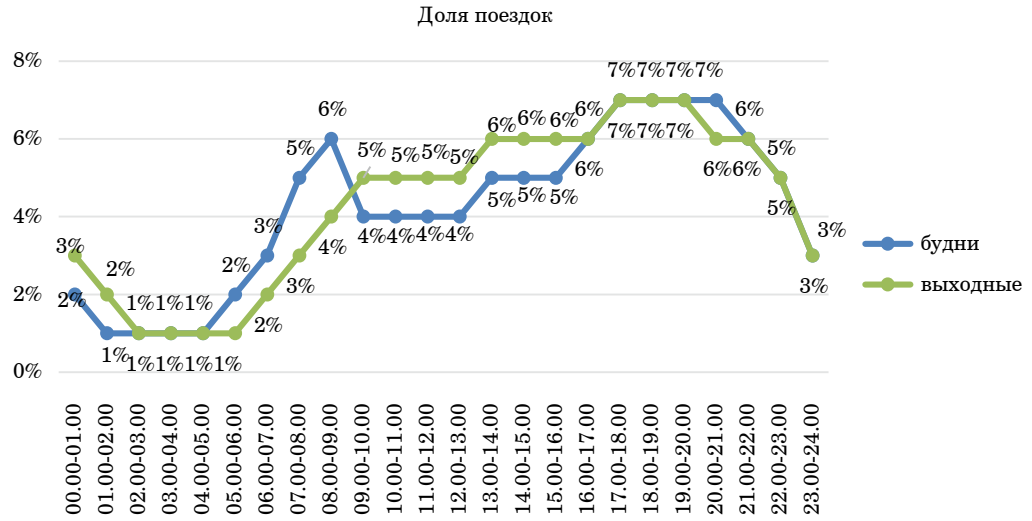


Рис. 4. Диаграмма распределения доли поездок на каршеринге по времени суток

«транспорт последней мили», который используется для коротких поездок внутри и между районами города. При чем данной услугой все больше пользуются не только молодые люди до 25 лет, но достаточно зрелые люди от 30–50 лет. Для определения мероприятий по улучшению данного вида сервиса было проведено исследование аналитиками Центра организации дорожного движения Москвы в 2021 г., в ходе которого была проведена качественная и количественная оценка сервиса.

В ходе исследования было выявлено, что в 2021 г. спрос на кикшеринг значительно вырос, за год услугами проката самокатов воспользовались 8,6 млн раз, тогда как в 2020 – ~2 млн раз. За рассматриваемый год, москвичи ездили на самокатах 8,6 млн раз – в среднем 35 тыс. аренд каждый день, но при этом такие альтернативы личному транспорту, как каршеринг и такси, остаются более популярными, чем средства индивидуальной мобильности. На рис. 5 представлена диаграмма распределения количества поездок по дням недели в исследуемый период.

Как из нее видно больший спрос на услуги проката самокатов наблюдается в выходные дни, при этом в рабочие и нерабочие дни кикшерингом пользуются по-разному. В выходные и праздничные дни трафик спроса постепенно растет с 8 утра до 6 вечера, при этом в будни есть два пика: утром с 9 до 10 и вечером с 18 до 20, появление пиковых спросов обусловлено тем, что пользователи все чаще стали использовать самокат для совершения краткосрочных поездок. На рис. 6 представлена диаграмма распределения доли поездок на самокатах.

Период работы кикшеринга в течение года в большей степени зависит от погодных условий, так анализ распределения поездок по месяцам был проведен с апреля по ноябрь показал, что рост спроса на услуги проката самокатов наблюдается в летние месяцы, это обусловлено увеличением пользователей в период отпусков. В ве-

Рис. 5. Диаграмма распределения количества поездок

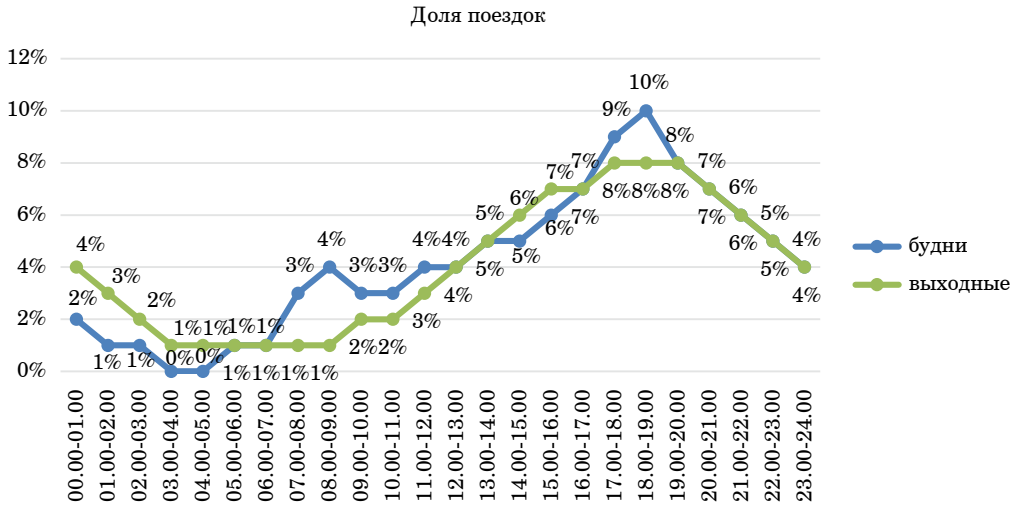


Рис. 6. Диаграмма распределения доли поездок на самокатах

сенние и осенние периоды года наблюдается сокращение количества поездок по отношению к летнему периоду, в первую очередь это может быть объяснено погодными условиями, так как пользователям было намного безопаснее и комфортнее воспользоваться услугами общественного транспорта. В среднем за сутки в августе пользователям были доступны 18 тыс. самокатов, при этом в течение дня 8 самокатов из 10 были в аренде. На рис. 7 представлена диаграмма распределения поездок по месяцам года.

Аналитиками Центра организации дорожного движения Москвы была составлена тепловая карта, показывающая плотность распределения поездок в течение дня, чем насыщеннее и теплее цвет карты, тем больше поездок заканчивалось в этом сегменте [3]. На рис. 8 представлена тепловая карта Москвы, на которой наглядно видно распределение заказов на использование самокатами.

На основании тепловой карты, полученной в результате проведенного исследования, можно сделать вывод о том, самокаты становятся частью мультимодальных маршрутов – тех, в которых используются разные транспортные средства, при чем как начальном или конечном отрезке пути в отдельности, так и пользователь может использовать эти сервисы и в начале, и в конце своего пути.

Наибольшей популярностью прокат самокатов пользовался в непосредственной близости расположения метро, так как пользователи предпочитали воспользоваться услугой проката чтобы добраться до станции и от станции до конечной точки своего маршрута.

Байкшеринг

Еще одной технологией способной обеспечить потребность пользователей в перемеще-

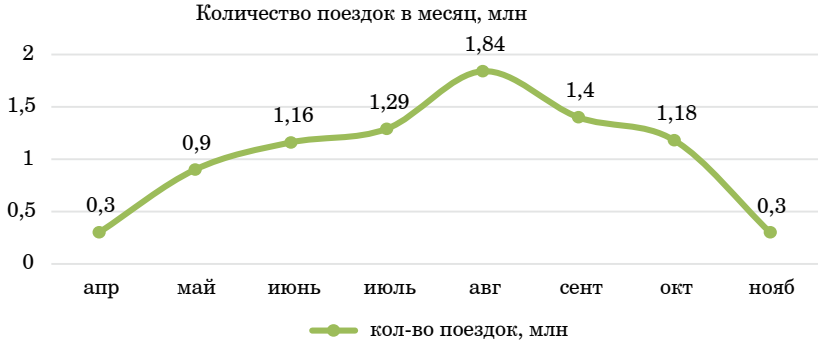


Рис. 7. Диаграмма распределения поездок по месяцам года.

нии в городских условиях является услуга проката велосипедов или байкшеринг.

Байкшеринг (англ. Bikesharing – переводится как «совместное использование велосипедом») – это услуга мобильности, которая основана на краткосрочном доступе к арендованным велосипедам по мере необходимости.

В условиях высокой автомобилизации городов, велопрокат рассматривается как неотъемлемая часть городской транспортной инфраструктуры и служит дополнением к общественному транспорту, который становится все более популярным во всем мире. На сегодняшний день насчитывается более 1600 провайдеров, предлагающих в общей сложности 18 млн велосипедов для совместного использования, в то время как в 2005 г. в мире было всего 17 велосервисов.

В России первым городом, который запустил систему прокатов велосипедов, стала Москва, реализация пилотный проект началась в 2013 г. За первый год реализации программы, сервисом прокатов велосипедов воспользовалось больше 64 тыс. человек, но уже к 2015 г. количество пользователей увеличилось в 7 раз. Велосипедная инфраструктура в Москве создавалась с нуля, но уже к 2015 г. общая протяженность велодорожек в Москве составила 250 км, что позволило в значительной степени повысить безопасность участников движения. [3]

На сегодняшний день в столице насчитывается более 773 км велодорожек, 700 станций проката и 7000 велосипедов. Значительное увеличение велодорожек и в целом развитие велоинфраструктуры способствовало тому, в среднем по столице приходится более 6,1 поездок на один велосипед в сутки, что более чем в 2 раза больше, чем в Лондоне – одном из городов-лидеров по популярности велопроката – в британской столице на один велосипед в среднем приходится 2,6 поездки. Такие показатели означают, что пользователи стали пересаживаться на велосипед с целью совершения целевых поездок, а не просто для проведения досуга. На рис. 9 представлена карта велодорожек Москвы.

Вывод

Новые услуги мобильности меняют транспортный сектор, либо предоставляя совершенно новые мобильные решения, либо изменение традиционных транспортных средств с помощью внедрения прогрессивных методов управления городскими транспортными потоками [5].

В целом, рост новых услуг сервиса «Мобильность как услуга» был связан с сокращением использования личных автомобилей и увеличение использования общественного транспорта. В целом, новые услуги мобильности заменяют

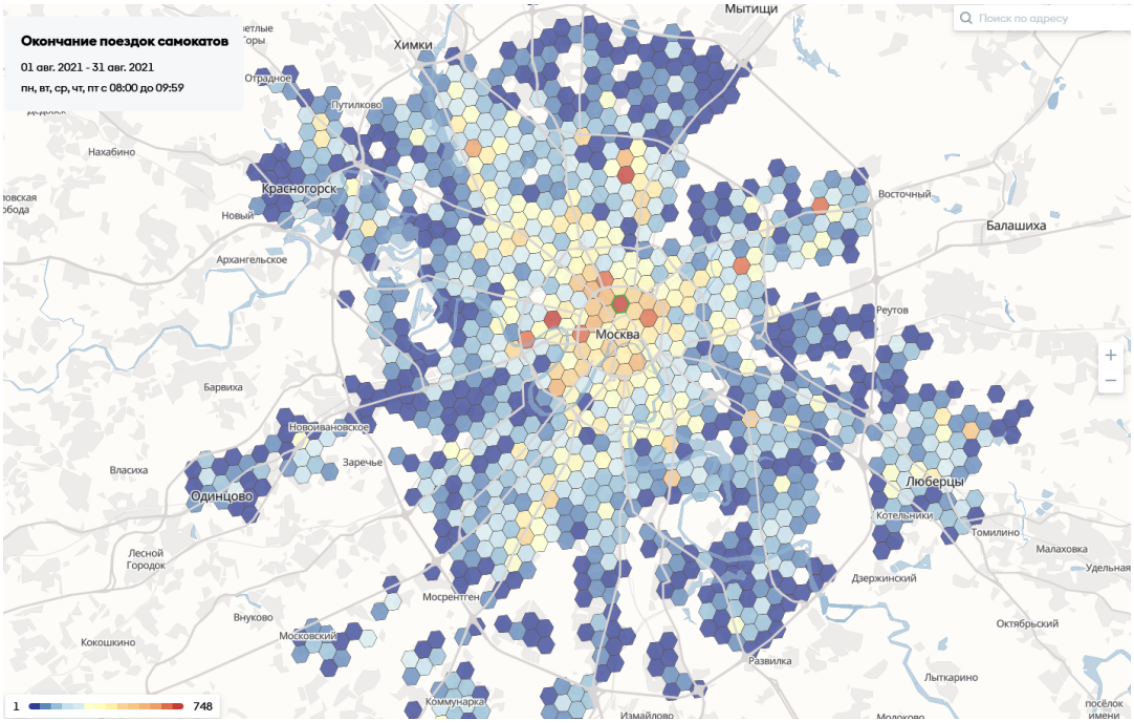


Рис. 8. Тепловая карта Москвы

Рис. 9. Карта велодорожек Москвы

большее поездок на личном транспорте, чем на общественном транспорте.

Рассмотренные концепции, такие как кикшеринг, байкшеринг, каршеринг не выполняют такие же цели как личное транспортное средство или общественный транспорт; они лишь частично дополняют. Системы прокатов способны решить проблему «первой и последней мили», которая связанна с доступом к общественному транспорту или перемещениями внутри района.

Услуги же сервиса «Мобильность как услуга» как правило, используются в сочетании с общественным транспортом, так как они позволяют расширить зону охвата общественного транспорта и в целом обеспечить большую связанность транспортной сети городов в результате развития мультимодальных поездок.

На сегодняшний день, основной проблемой и сложностью при реализации сервиса «Мобильность как услуга» является то, что все системы транспорта, включая общественный транспорт и сервисы проката, представлены отдельными сегментами спроса, а не являются частями единой системы. Решением данной проблемы может стать интеграция всех существующих транспортных систем в единую систему, способную в большей степени повлиять на эффективность мобильности пользователей городов.

Библиографический список

1. Аналитическая записка UITP: Готовы к MaaS. Легче мобильность для граждан и лучше данные по городам. URL: https://www.uitp.org/publications/better-urban-mobility-playbook/ (дата обращения: 23.11.2022).

2. *Бурмистров А. Н., Солодкий А. И.* Управление транспортными потоками: монография. М.: Инфара-М, 2019. 207 с.

3. Официальный сайт Центра организации дорожного движения Москвы. URL: https://i.transport.mos.ru/flyover (дата обращения: 30.11.2022).

4. Официальный сайт Московского велопроката. URL: https://velobike.ru (дата обращения: 30.11.2022).

5. Рекомендации по ориентированному на пользователя подходу к MaaS. URL: https://maas-alliance.eu/homepage/what-is-maas/ (дата обращения: 01.12.2022).

УДК 656.71 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-174-180**

Д. В. Калакутская*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЭРОПОРТОВ ПУЛКОВО И ВНУКОВО

В статье проводится сравнительный анализ по ключевым показателям работы аэропортов Пулково и Внуково. Для сравнения выбраны такие показатели, как пассажиропоток, объем обработки грузов, чистая прибыль, транспортная доступность, популярные направления полетов, как итог, предлагаются варианты для улучшения показателей аэропорта Пулково.
Ключевые слова: *аэропорт, анализ, пассажиропоток, перевозка грузов, транспортная доступность, Пулково, Внуково.*

D. V. Kalakutskaya*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF PULKOVO AND VNUKOVO AIRPORTS

The article provides a comparative analysis of the key performance indicators of Pulkovo and Vnukovo airports. For comparison, such indicators as passenger traffic, cargo handling volume, net profit, transport accessibility, popular flight destinations are selected. As a result, options are offered to improve the performance of Pulkovo Airport.
Keywords: *airport, analysis, passenger traffic, cargo transportation, transport accessibility, Pulkovo, Vnukovo.*

Введение

В современном мегаполисе, все больше внимания уделяется авиаперевозкам, но пандемия COVID-19 и меры, введенные для ее ограничения, привели к резкому снижению международных пассажирских авиаперевозок, а также снижению спроса на внутренних воздушных направлениях. Пассажиропоток в аэропортах России за 6 месяцев 2020 г. составил 50,1% от уровня аналогичного периода прошлого года. По прогнозам Международной ассоциации воздушного транспорта, возвращение к прежним объемам авиапассажирских перевозок ожидается не ранее 2023 г.

Пандемия COVID-19 повлияла на пассажиров, снизив их расположенность к воздушному транспорту. В связи с этим, высокую значимость приобретает проблема увеличения эффективности деятельности субъектов авиатранспортного рынка в ближайшем будущем. С целью повышения объемов пассажиропотока, лояльности пассажиров, а также увеличения качества предоставляемых услуг.

Данное исследование позволит сделать выводы о том, какие показатели схожи у аэропортов, в чем есть недостатки и какие присутствуют достоинства. Таким образом, можно будет понять в каких характеристиках различаются аэропорты схожие по пассажиропотоку, проработать недостатки и внедрить достоинства другого аэропорта.

Сравнительный анализ по ключевым показателям работы аэропортов

Для определения, какие аэропорты целесообразно сравнивать приведена табл. 1.

Как можно заметить из таблицы, наиболее близкие показатели с аэропортом Пулково имеет аэропорт Внуково (г. Москва).

Далее можно сравнить два аэропорта по ключевым характеристикам (табл. 2).

Международный аэропорт Пулково – международный аэропорт, имеет статус федерального значения, и располагается в 15 км от центра Санкт-Петербурга в Московском районе. Единственный аэропорт Санкт-Петербурга, об-

Таблица 1

Пассажиропоток в аэропортах разных городов России

Город	Аэропорт	Пассажиропоток, млн чел. за 2021 г.
Москва	Шереметьево	30,623
Москва	Домодедово	25,065
Санкт-Петербург	Пулково	18,043
Москва	Внуково	17,999
Адлер	Сочи	11,076
Новосибирск	Толмачево	6,662
Екатеринбург	Кольцово	5,973

Таблица 2

Сравнительные характеристики аэропортов Пулково и Внуково

Характеристика	Аэропорт Пулково	Аэропорт Внуково
Управляющая компания	ООО «Воздушные ворота Северной столицы»	АО «Международный аэропорт „Внуково“»
Дата основания	24 июня 1932 года	2 июля 1941 года
Общая площадь аэропорта	1350 га	823 га
Максимальная пропускная способность терминала в час/год	1800 пасс./18 млн пасс.	10100 пасс./35 млн пасс.
Количество взлетно-посадочных полос	2 (Южная – 3780х60 м, Северная – 3397х60 м)	2 (3500х60м, 3060х45м)
Количество стоек регистрации	88	172
Количество кабин паспортного контроля	110	130
Количество стоянок для воздушных судов	110	Более 200
Количество багажных лент	7	13
Количество телетрапов	16	37
Количество выходов на посадку	37	64

служивающий официальные рейсы. Аэропорт Пулково – один из крупнейших аэропортов России. По итогам 2021 года, входит в список лучших аэропортов Европы по качеству сервиса.

Главным оператором Пулково с 2010 года является международный консорциум «Воздушные Ворота Северной Столицы». Управляющая компания аэропорта реализует первый в авиационной отрасли России проект на основе государственно-частного партнерства. Базовым перевозчиком аэропорта является авиакомпания «Россия».

В аэропорту развита инфраструктура. Есть информационная стойка, банкоматы, камера хранения, детские зоны, капсулы для сна и отдыха. На территории транспортного узла пассажирам предоставляется бесплатный Wi-Fi, а также есть специальные стойки, где можно бесплатно зарядить мобильный телефон. Пассажиры могут упаковать багаж, положить вещи в камеру хранения, воспользоваться багажными тележками и услугами носильщиков [1].

Норма перевозки бесплатного багажа – вес, размер и количество мест – зависит от направления рейса и класса обслуживания пассажира и определяется правилами авиакомпании. Информация о норме бесплатного багажа, как правило, указывается в соответствующей графе авиабилета или отображается при бронировании, рис. 1.

В аэропорт Пулково в данный момент можно добраться только на автобусе, такси или личном транспорте (рис. 2, *а*). На рис. 2, *б* приведен возможный проект по введению в эксплуатацию трамвая с пр. Космонавтов, Надземного экспресса от Московского вокзала, Аэроэкспресса от Балтийского вокзала, а также автобуса от станции метро Проспект Ветеранов. Введение хотя бы одного из предложенных вариантов позволит значительно снизить нагрузку на автобусный маршрут № 39, а также повысит уровень удовлетворенности пассажиров.

Аэропорт Внуково имени А. Н. Туполева – международный аэропорт федерального зна-

а) б)

Рис. 1. Инфраструктура аэропорта Пулково: а – панорамное фото аэропорта Пулково; б – порядок действий пассажиров при подготовке к процедуре досмотра в аэропорту Пулково

а) б)

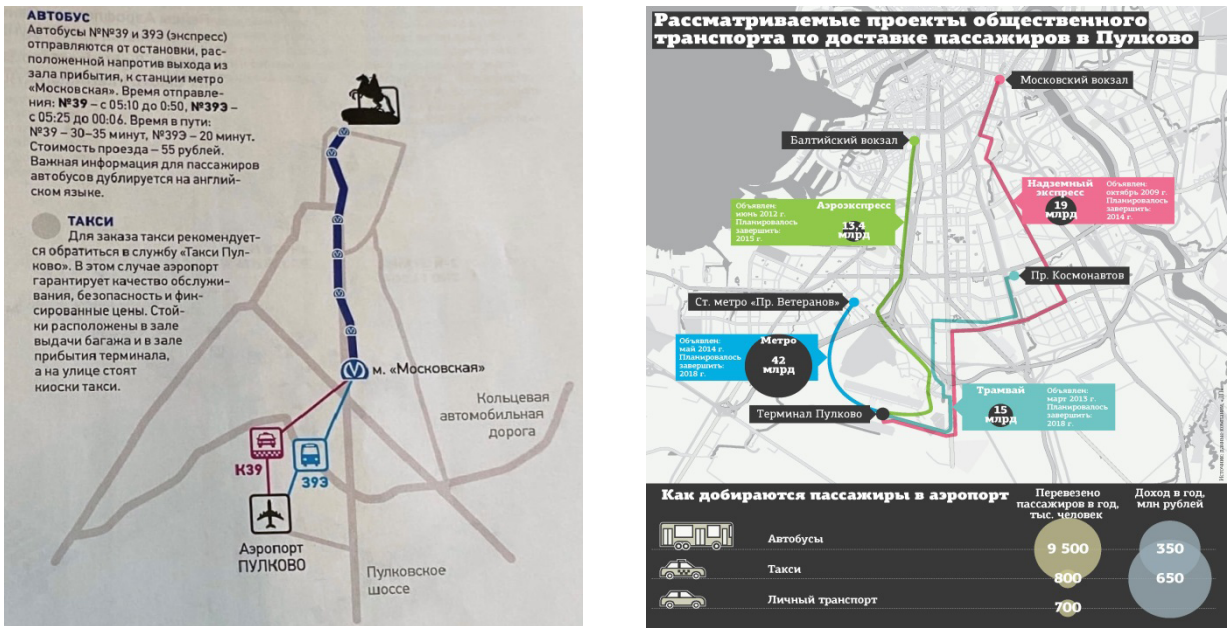


Рис. 2. Транспортная доступность аэропорта Пулково: а – существующая транспортная доступность аэропорта Пулково; б – проект совершенствования транспортной доступности

чения, являющийся аэропортом совместного базирования (совместно с ФСБ России и ФСО России). Обслуживает главным образом рейсы по России, низкобюджетные и чартерные рейсы авиакомпаний группы «Аэрофлот» (но не рейсы самого «Аэрофлота»), а также некоторые международные рейсы в пределах Европы и СНГ. С момента открытия наделен правом принимать воздушные суда высших должностных лиц России, а также глав иностранных государств и правительств, прибывающих в страну.

Аэропорт состоит из трех пассажирских терминалов и грузового терминала «Внуково-Карго». Основной пассажирский комплекс «Внуково-1» состоит из терминалов «A», «B» и «D». Комплекс «Внуково-2» используется для обслуживания спецрейсов высших руководителей России, а также руководителей других стран. Терминалы «Внуково-3» обслуживают рейсы бизнес-авиации, спецрейсов правительства Москвы и авиации Роскосмоса.

Аэропорту присвоен третий уровень координации по классификации IATA. В 2018 г. по ито-

гам всероссийского конкурса «Великие имена России» аэропорту Внуково присвоено имя советского ученого и авиаконструктора Андрея Николаевича Туполева (рис. 3).

В январе 2019 г. мэрией Москвы было одобрено продление Калининско-Солнцевской линии метро до аэропорта. Строительство участка линии длиной 5,4 км от станции метро «Рассказовка» планировалось завершить до конца 2022 г. (срок открытия перенесен на 2023 г.). Таким образом, «Внуково» может стать первым ныне действующим московским аэропортом, имеющим станцию метро [2].

Аэропорт Внуково – самый высокий аэропорт Москвы (204 м над уровнем моря), поэтому в случае тумана он часто служит альтернативным аэропортом. Он имеет два пассажирских терминала, терминал авиации общего назначения и один грузовой терминал [3].

На данный момент в аэропорт Внуково можно добраться несколькими возможными вариантами, среди которых метро, аэроэкспресс, автобусы, такси личный транспорт, кроме этого в данный момент строится станция метро «Внуково», которая откроется в самом аэропорту в 2023 г. (рис. 4).

Для дальнейшего сравнения аэропортов, можно представить в виде таблицы такие параметры как: пассажиропоток, обработка грузов, чистая прибыль.

Статистические данные учитывают объемы пассажирских и грузовых перевозок на воздуш-

а) б)

Рис. 3. Инфраструктура аэропорта Внуково: а – вид сверху на аэропорт Внуково; б – схема аэропорта Внуково

Рис. 4. Транспортная доступность аэропорта Внуково

Таблица 3

Сравнение пассажиропотока за 2014–2021 гг.

Аэропорт/год	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Пулково:								
Пассажиропоток, млн пасс.	14,26	13,50	13,26	16,12	18,12	19,58	10,94	18,03
Обработано грузов, тыс. т	25,36	22,54	25,38	28,75	27,50	27,4	17,1	19,6
Чистая прибыль (убыток), млн руб.	–14586,0	353,3	2691,0	1540,0	3446,0	6193,0	–4519,0	–
Внуково:								
Пассажиропоток, млн пасс.	12,73	15,81	13,94	16,12	21,47	24,00	12,55	17,99
Обработано грузов, тыс. тонн	37,19	36,70	44,15	58,49	62,60	48,89	45,76	57,36
Чистая прибыль (убыток), млн руб.	–1,36	–107,27	–219,5	–227,7	884,98	919,36	–307,7	–

ном транспорте с 2014 до 2021 гг. При помощи наглядно представленной статистики можно сравнить пассажиропотоки крупнейших российских аэропортов Москвы (Внуково) и Санкт-Петербурга (Пулково). Данные представлены в виде гистограмм (рис. 5, 6).

Анализ представленных данных показывает, что по итогам деятельности аэропорта Пулково за 2020 г. произошло уменьшение грузооборота на 53% в сравнении с показателем за 2019 г. У аэропорта Внуково в 2020 г. в сравнении с 2019 произошло снижение на 6%. В 2021 г. аэропорту Внуково удалось превысить показатели «докризисного» 2019 г., а у аэропорта Пулково произошло незначительное повышение показателей, восстановить прежний уровень не удалось [4].

Количество рейсов по основным маршрутам перелетов с рассматриваемых аэропортов также крайне неравномерны (рис. 7, 8).

Исходя из представленных на рис. 7 и 8 данных можно сделать вывод, что количество рейсов по маршруту из Пулково в Москву резко преобладает над остальными рейсами (практически в 10 раз), а из Внуково количество рейсов уменьшается равномерно. Это может означать,

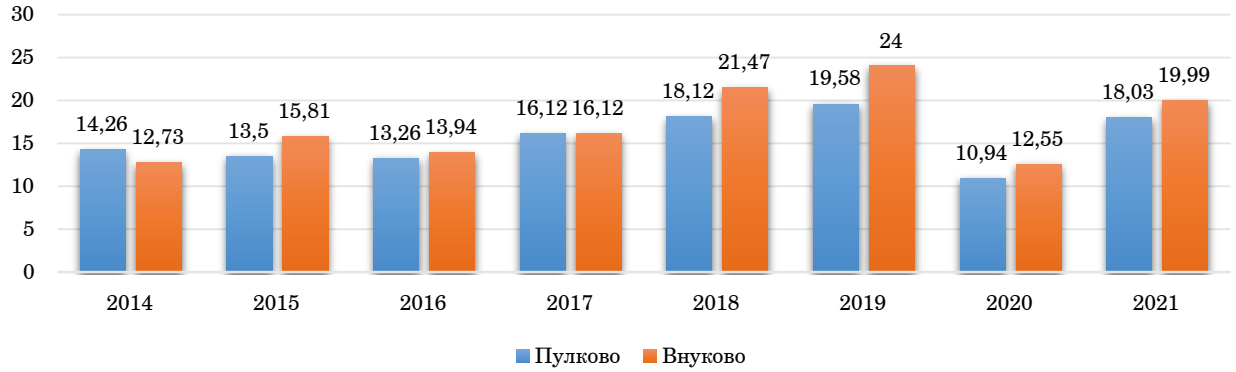


Рис. 5. Сравнительный анализ пассажиропотока аэропортов Пулково и Внуково за 2014–2021 гг.

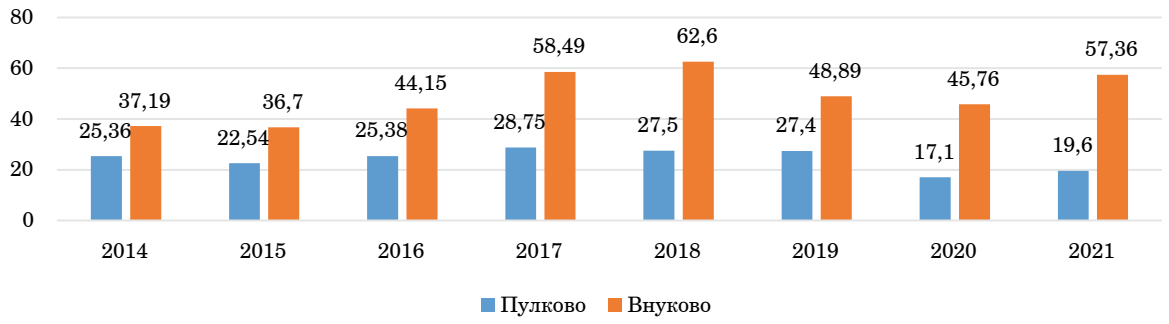


Рис. 6. Сравнение показателей обработанных грузов аэропортами Пулково и Внуково за 2014–2021 гг.

что пассажиры выбирают московский аэропорт для полетов за границу и по России, и сначала летят из Санкт-Петербурга в Москву.

На следующем графике представлены изменения чистой прибыли АО «Международный аэропорт «Внуково»» и ООО «Воздушные ворота северной столицы» за период с 2012 по 2020 гг.

Анализ графиков показывает, что в 2020 г., в связи с пандемией COVID-19, произошло значительное снижение прибыли как у аэропорта Внуково, так и у аэропорта Пулково. Однако до кризисного 2020 г. Пулково имел более высокую прибыль, чем аэропорт Внуково.

В 2018 г. аэропорт «Пулково» обслужил 18 122 286 пассажиров, что на 12,4% превышает результат 2017 г. При этом на внутренних воздушных линиях по итогам 2018 г. пассажиропоток вырос на 10,8%, что составило 11 028 468 человек. На международных воздушных направлениях за указанный период объем перевозок увеличился на 14,9% относительно показателя 2017 г. – до 7 093 818 человек. В 2019 г. аэропорт

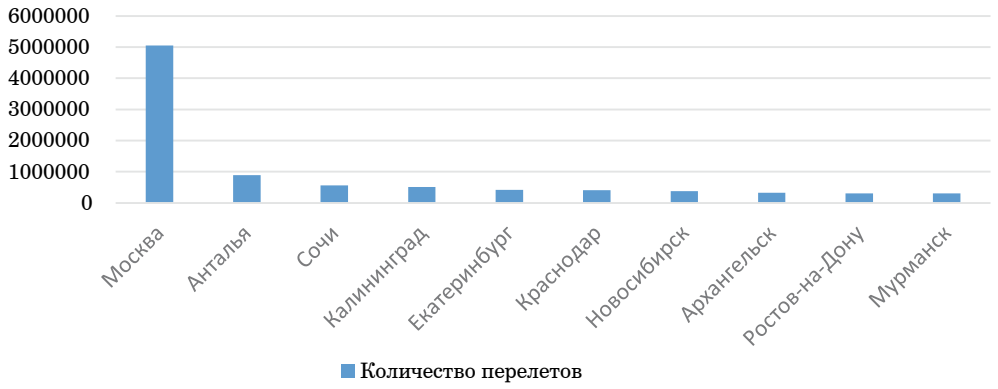


Рис. 7. Самые популярные направления аэропорта Пулково

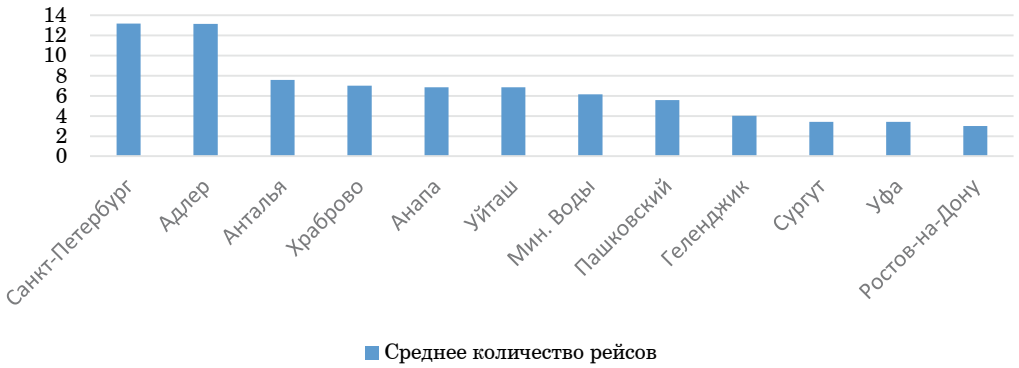


Рис. 8. Самые популярные направления аэропорта Внуково

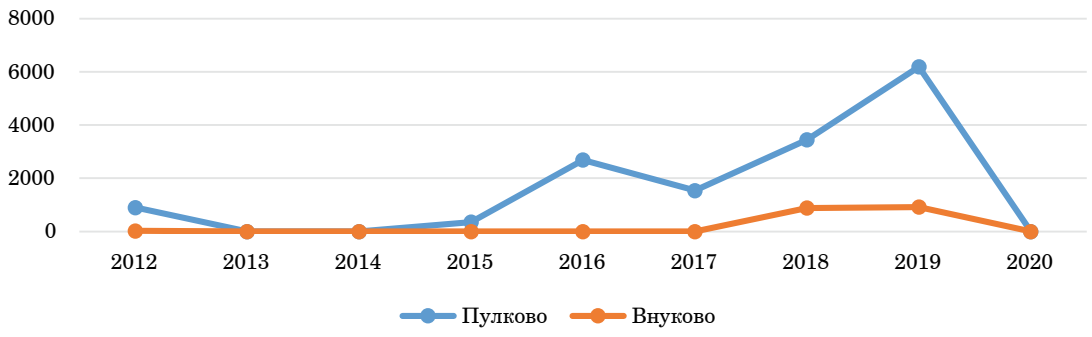


Рис. 9. Чистая прибыль (убыток) операторов аэропорта Внуково и Пулково, млн руб.

«Пулково» обслужил 19 581 262 пассажиров, что на 8,1% превышает результат 2018 г. и стало рекордным показателем за все время его работы. Пассажиропоток аэропорта «Пулково» за 2020 г. по сравнению с 2019 г. уменьшился на 44% (до 10,9 млн чел.).

В 2019 г. аэропорт «Пулково» обработал 27,4 тыс. т грузов, что на 0,36% ниже чем было обработано в 2018 г. А в 2020 г., в сравнении с 2019 г., объем обработанных грузов снизился на 37,6%. Но в 2021 г. произошел рост на 14,6% [5].

Для сравнения аэропорт «Внуково» за 2018 г. обслужил 21,47 млн пассажиров, что на 33,2% превышает результат 2017 г. В 2019 г. аэропорт «Внуково» обслужил 24 млн пассажиров, что на 11,8% превышает результат 2018 г. Пассажиропоток аэропорта «Внуково» за 2020 г. в сравнении с 2019 годом уменьшился на 47,7%.

В 2019 году аэропорт «Внуково» обработал 48,89 тыс. тонн, что на 21,4% ниже, чем было обработано в 2018 году. А в 2020 году, в сравнении с 2019 г., снизился на 6,4%. Но в 2021 г. произошел рост на 20,22%, т. е. данный показатель даже превзошел «доковидный» показатель в 2019 г.

Падение пассажиропотока обусловлено неблагоприятной санитарно-эпидемиологической обстановкой (пандемия COVID-19), закрытием международного сообщения и временным сокращением большинства внутренних рейсов. Падение трафика на международном воздушном сообщении составило более 80 % по отношению к 2019 г.

Можно заметить, что аэропорту Внуково по объему обработанных грузов после кризисного 2020 г. удалось восстановить и даже увеличить объемы, но по пассажиропотоку полностью восстановиться в 2021 г. не удалось. Аэропорт Пулково в 2021 г. не смог восстановить прежние объемы ни по пассажиропотоку, ни по обработанным грузам.

Заключение

В данной статье был проведен анализ, в результате которого, можно сделать вывод, что у аэропортов Внуково и Пулково, примерно одинаковый пассажиропоток, но при этом Внуково имеет большую пропускную способность терминала в час/год, больше взлетно-посадочных полос, стоек регистрации, кабин паспортного контроля, стоянок для воздушных судов, багажных лент, телетрапов, выходов на посадку. Кроме того, имеет более удобную транспортную доступность. Поэтому для увеличения показателей пассажиропотока, грузопотока в аэропорту Пулково следует построить новый терминал и улучшить транспортную доступность. Так же в 2020 г. произошло значительное снижение показателей, в связи с пандемией COVID-19, а в 2021 г. происходило постепенное возвращение к предыдущим показателям.

Библиографический список

1. Официальный сайт компании ООО «Воздушные Ворота Северной Столицы». URL: http://www.pulkovoairport.ru (дата обращения: 01.12.2022).

2. Официальный сайт компании АО «Международный аэропорт Внуково». URL: http://vnukovo.ru (дата обращения: 01.12.2022).

3. *Казьмина И., Бородина В., Седлов Д. 20* самых удобных аэропортов России. URL: https://www.forbes.ru/biznes-photogallery/399177-20-samyh-udobnyh-aeroportov-rossii-reyting-forbes (дата обращения: 01.12.2022).

4. *Манжурова О. Д.* Повышение конкурентоспособности аэропортовых комплексов на международном рынке авиатранспортных услуг: диссертация кандидата экономических наук. М., 2018. 184 с.

5. Оборудование и организация обслуживания пассажиров в залах и режимных зонах аэропорта: стандарт Системы добровольной сертификации сервисных услуг на транспорте. М.: НП «Ассоциация производителей сервисных услуг для пассажиров на транспорте», 2020. 14 с.

УДК 656.02

Е. С. Каргина*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЫБОР МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

В статье рассматриваются вопросы выбора модели для решения глобальной задачи. Проводится анализ и сравнения программ для моделирования транспортного потока «VisSim 7» и «AnyLogic».
Ключевые слова: *имитационное моделирование, проектирование перекрестков, анализ дорожной сети, транспортные потоки.*

E. S. Kargina*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

CHOOSING A MODEL FOR SOLVING A GLOBAL PROBLEM

Abstract: the article discusses the issues of choosing a model for solving a global problem. The analysis and comparison of programs for modeling the traffic flow "VisSim 7" and "AnyLogic" is carried out.
Keywords: *simulation modeling, intersection design, road network analysis, traffic flows.*

Введение

В связи с развитием городов возникает необходимость в решении таких глобальных проблем как распределение транспортного потока и обеспечение комфортного и безопасного передвижения в мегаполисе, для чего, например, проектируются новые развязки и пешеходные зоны, новые участки дороги и устанавливаются светофоры, а для того, чтобы точнее определить, где же лучше всего расположить те или иные объекты необходимо изначально промоделировать ситуацию, и для этого можно использовать такие компьютерные программы как «PTV Vision Vissim» и «AnyLogic».

Имитационное моделирование

Моделирование подразумевает под собой представление какого-либо реального объекта (или нескольких объектов) в виде упрощенной модели в искусственно созданной схожей с реальностью среде с целью изучения свойств и поведения этого объекта в данной среде и взаимодействия среды и объекта.

Компьютерное имитационное моделирование предполагает воспроизводство системы среды и объектов на ЭВМ. Данный вид моделирования удобен достаточной наглядностью и компактностью (всю информацию можно сохранить на ноутбуке), также отсутствием необходимости поиска материалов для построения модели. Например, для воспроизведения ситуации на каком-либо участке дороги не нужно делать макет (из дерева, пластика или бумаги), достаточно спроектировать его на компьютере, задав необходимые параметры, и запустить.

Имитационное моделирование в «PTV Vision Vissim»

«PTV Vision Vissim» [1] – пакет ПО по планированию транспортных потоков и организации дорожного движения (визуализация дорожного и пешеходного движения, сопровождение проектов и анализ схем организации движения, моделирование транспортных потоков для АСУ дорожного движения, оптимизация светофорных циклов.

Поставщик: компания «А+С Консалт», Санкт-Петербург.

Данная программа довольно проста и удобна в использовании, для работы с ней не нужны знания каких-либо языков программирования. В PTV Vision Vissim можно установить в каче-

стве подложки (фон) снимок со спутника или скриншот карты нужного участка дорожной сети и с помощью имеющихся в программе инструментов воспроизвести такие объекты как дороги (в программе «отрезки», при присоединении они образуют перекрестки), светофоры, для которых можно задать определенную цикличность, также можно сделать разметку дороги. Для задания транспортных потоков есть «объект сети» – «входящие потоки», как и сама дорога они устанавливаются на рабочем участке программы, «редакторе сети», в нужном месте этой дороги, также для функционирования системы необходимо задать траекторию движения объектов, для этого используется другой «объект сети» – «маршруты ТС», также выносящиеся на «редактор сети» и устанавливается в двух (начало и конец) местах.

Для большей реалистичности можно решить конфликт проблемных зон, например, при создании пешеходного перехода (рис. 1) можно установить «решения конфликтных зон» таким образом, чтобы машины всегда пропускали идущих по зебре людей. В программе также можно задать движение общественного транспорта, обозначить места остановок и задать частоту пребывания на них автобусов или трамваев.

Кроме непосредственно воспроизводства конкретной системы, программа позволяет производить анализ работы дорожной сети, например, устанавливать счетчики заторов или очередей (рис. 2), отображающие время в пути, длины очередей (пробок) или время задержки, и таким образом отслеживать обстановку при изменении таких параметров как интенсивность транспортного потока (в обычное время и в часы-пик), цикла светофорных сигналов, и далее делать определенные выводы по этим показателям, так, например, очевидно, что чем короче длина затора, тем лучше транспортная ситуация, и опираясь на это и меняя показатели тем или иным образом, вероятно найти тот результат, при котором эта самая длина будет минимальной.

Все необходимые элементы находятся в меню («объекты сети») слева на экране, а для редактирования объектов на «редакторе сети» необходимо нажать на них правой кнопкой мыши, после чего появится меню (рис. 3) выбора действий над объектом (дублировать или показать в списке (рис. 1)).

Имитационное моделирование в «AnyLogic»

В системе моделирования «AnyLogic» возможно осуществить три подхода к созданию имитационных моделей: процессно-ориентированный (дискретно-событийный), системно-динамический, агентный, также их можно комбинировать между собой. Графический интерфейс данной программы, ее инструменты и библиотеки предоставляют возможность строить модели как для таких простых задач типа моделирования производства, логистики и бизнес-процессов, так и для более сложных, например,

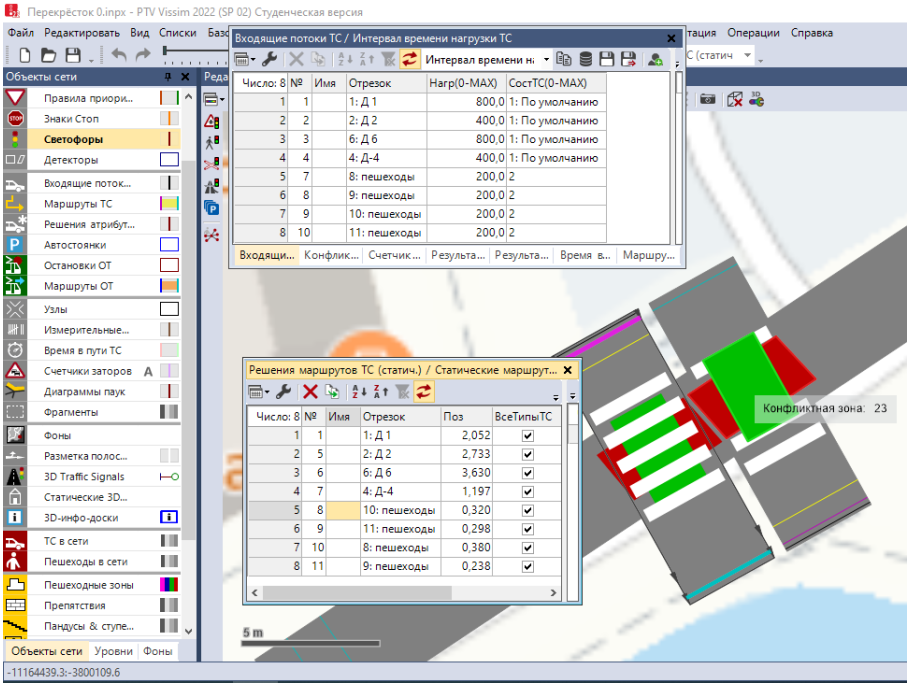


Рис. 1. Работа в программе «PTV Vision Vissim»

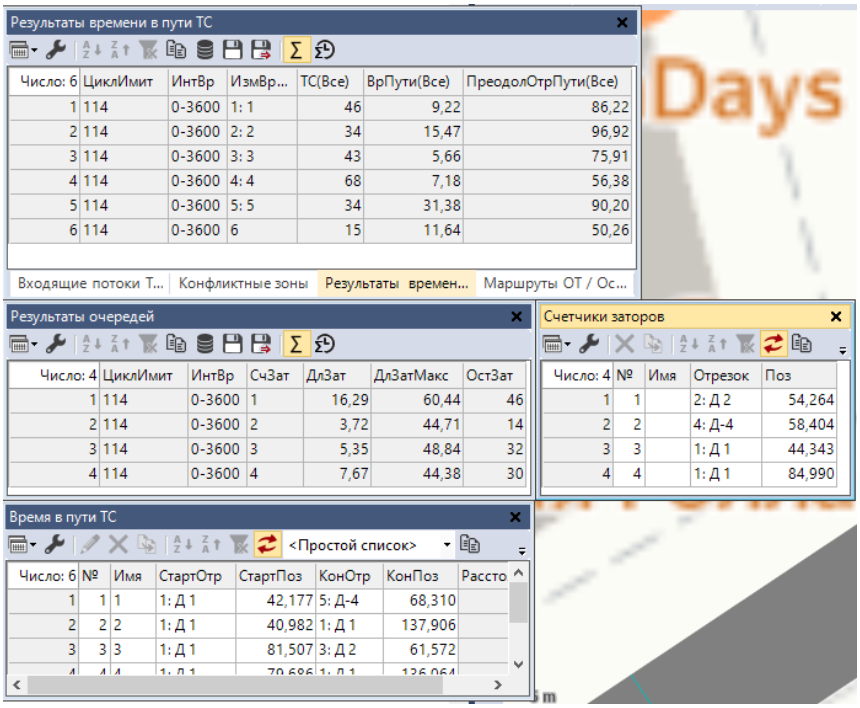


Рис. 2. Работа в программе «PTV Vision Vissim»

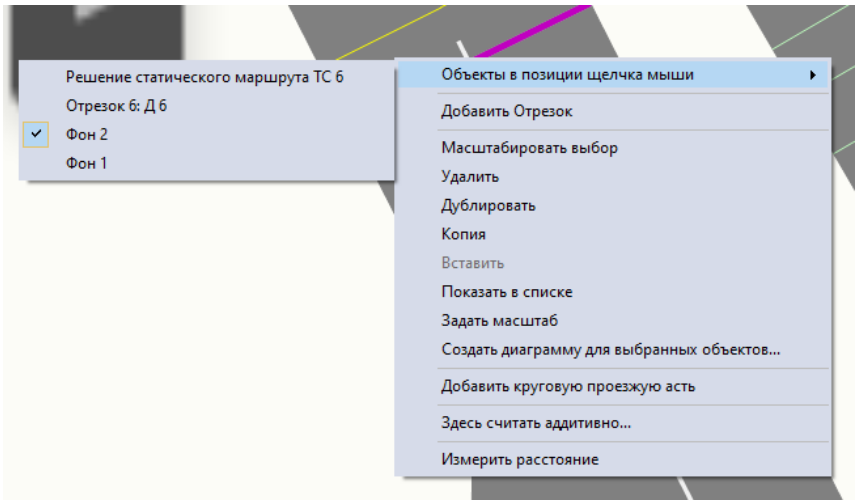


Рис. 3. Работа в программе «PTV Vision Vissim»

создание стратегических моделей развития компаний и рынков [2].

Производителем «AnyLogic» является американская компания «The AnyLogic Company».

Сравнение программ «AnyLogic» и «PTV Vision Vissim»

В отличие от «PTV Vision Vissim» в «AnyLogic» перекресток можно проработать более детально, так, например, для задания транспортного потока и его движения по сети в первой программе используются только соответствующие «объекты сети» «входящий поток» и «маршруты ТС», в то время как во второй для задания движения автомобилей на участке цепи необходимо использовать три блока из меню слева экрана: «carSource» – создающий агентов (автомобили), «carMoveTo» – задающий движение агентов (автомобилей) и «carDispose» – выводящий агентов (автомобили) из системы. Также на основной диаграмме «main» можно создать агента «car» – автомобиль, для которого автоматически создается новая диаграмма с одноименным названием. Таким образом, образуется иерар-

хия – дерево, состоящее во главе из самого рабочего проекта, далее из пакетов, на следующем уровне будут располагаться классы активных объектов и сообщений и т. д. (рис. 4). Процесс создания агента изображен на рис. 5, чтобы агентов стало несколько необходимо создать популяцию из агентов (рис. 6).

Чтобы задать значений для блока, например, «carSource» нужно нажать на него дважды правой кнопкой мыши, после чего с правой стороны экрана появится окно «свойства» (рис. 7), в котором можно указать цель движения, куда будет направляться объект и т. д. Также в «AnyLogic» позволяет вносить изменения в модель, как в процессе создания, так и при запуске программы.

Помимо агентов в программе существуют параметры, которые служат для задания уникальности агентов одного типа (объекты с одинаковым поведением), обычно используются для задания статических характеристик модели и часто хранят одно и то же значение в течение всего «прогона».

При помощи параметров можно создать гистограмму и затем собирать статистику при «прогоне» модели, например, на рис. 8 показан процесс сбора данных о времени проезда перекрестка [3] (рис. 8).

Далее, для еще более детального анализа перекрестка следует создать эксперимент под названием «оптимизация», на рис. 9 показаны свойства эксперимента, используются параметры длительности фаз светофоров. В качестве целевой функции используется локальная переменная «root» для обращения к корневому агенту (на языке «Java»).

На рис. 10 изображен запуск эксперимента, синим цветом на диаграмме обозначено лучшее значение эксперимента, серым текущие. Очевидно, что чем меньше значение, т. е. чем быстрее машины преодолевают перекресток, тем лучше. И чем качественнее спроектирован перекресток, тем меньше значения показателей и тем более они постоянны.

Помимо перечисленных отличий «PTV Vision Vissim», и «AnyLogic», например, можно рассмотреть (рис. 11) разницу регулировки движения по полосам транспортных средств в обеих программах.

На рис. 11 видно, что для задания регулировки движения автомобилей в первой программе используются только прямые и направленные в право или лево стрелочки на полосах дороги, в то время как вторая программа позволяет задать несколько вариантов пересечения перекрестка с каждой конкретной полосы на любую другую согласно правилам дорожного движения, притом агенты (автомобили) будут автоматически перестраиваться в нужную полосу перед пересечением этого перекрестка.

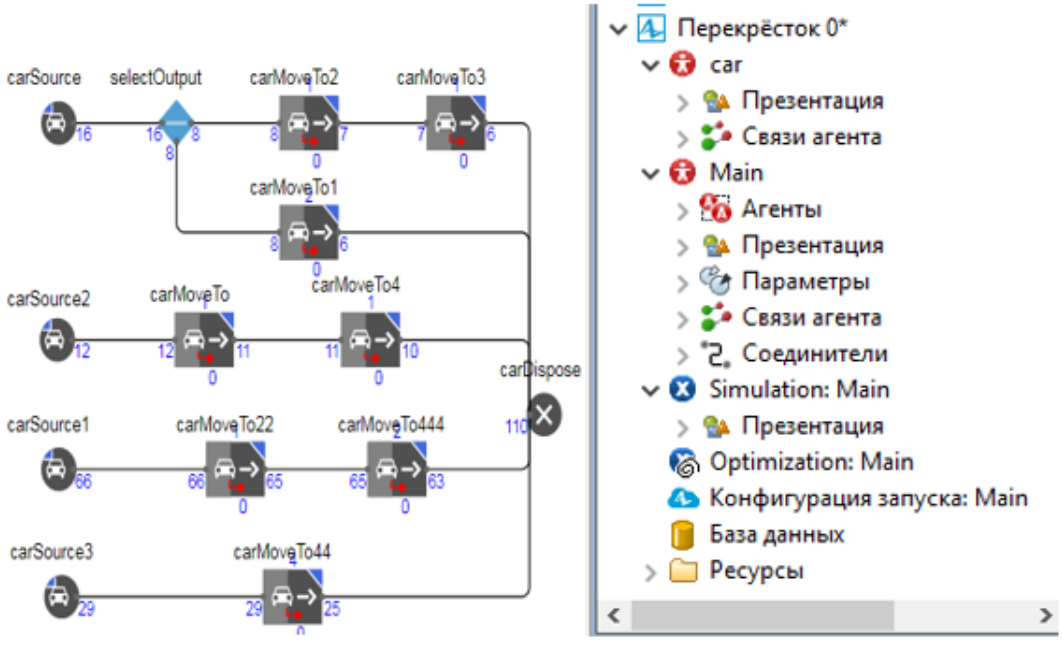


Рис. 4. Работа в программе «AnyLogic»

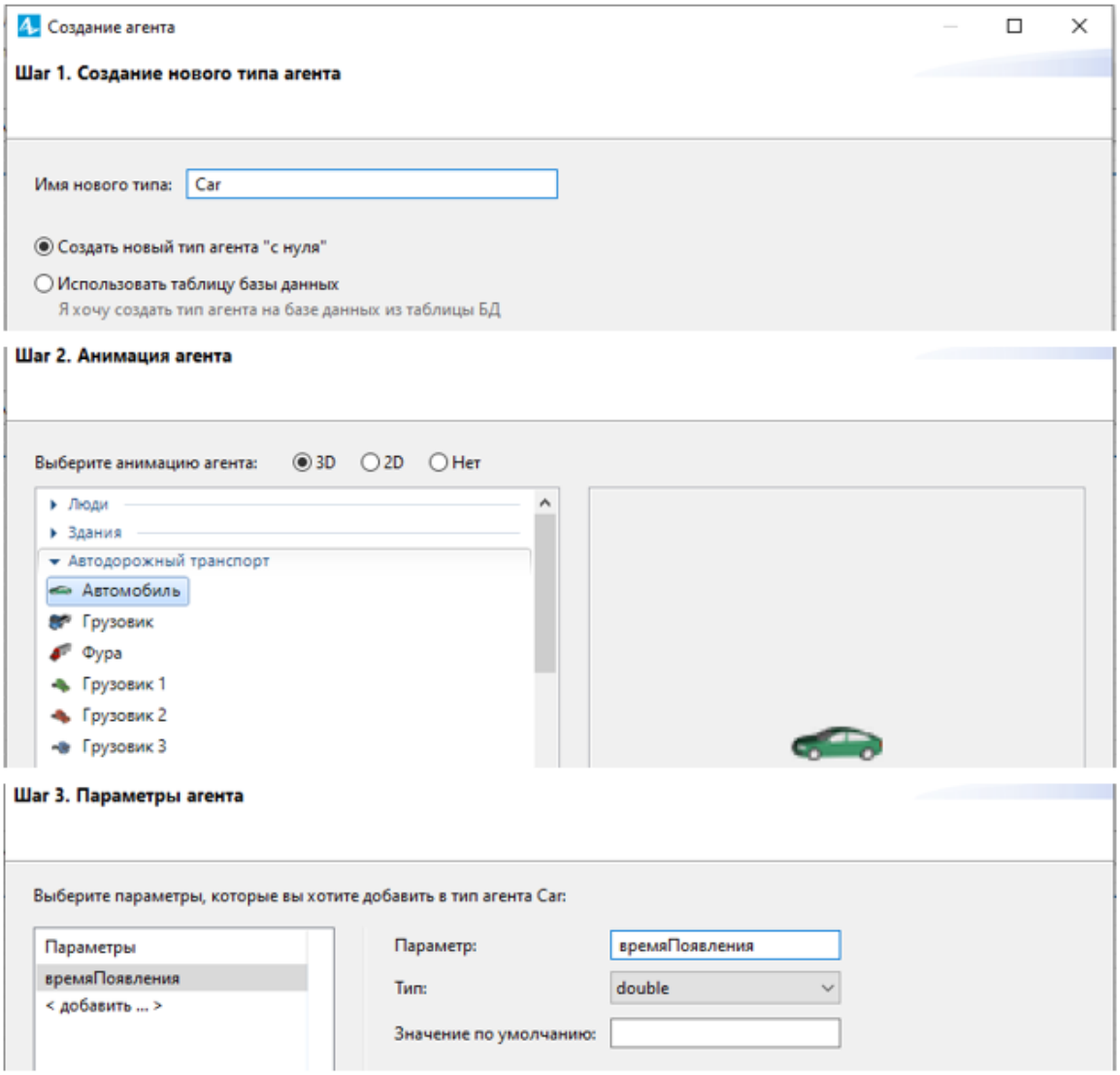


Рис. 5. Работа в программе «AnyLogic»

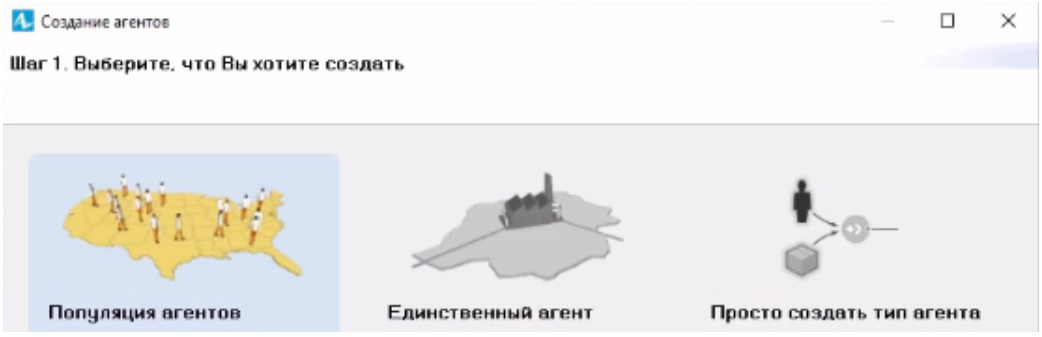


Рис. 6. Работа в программе «AnyLogic»

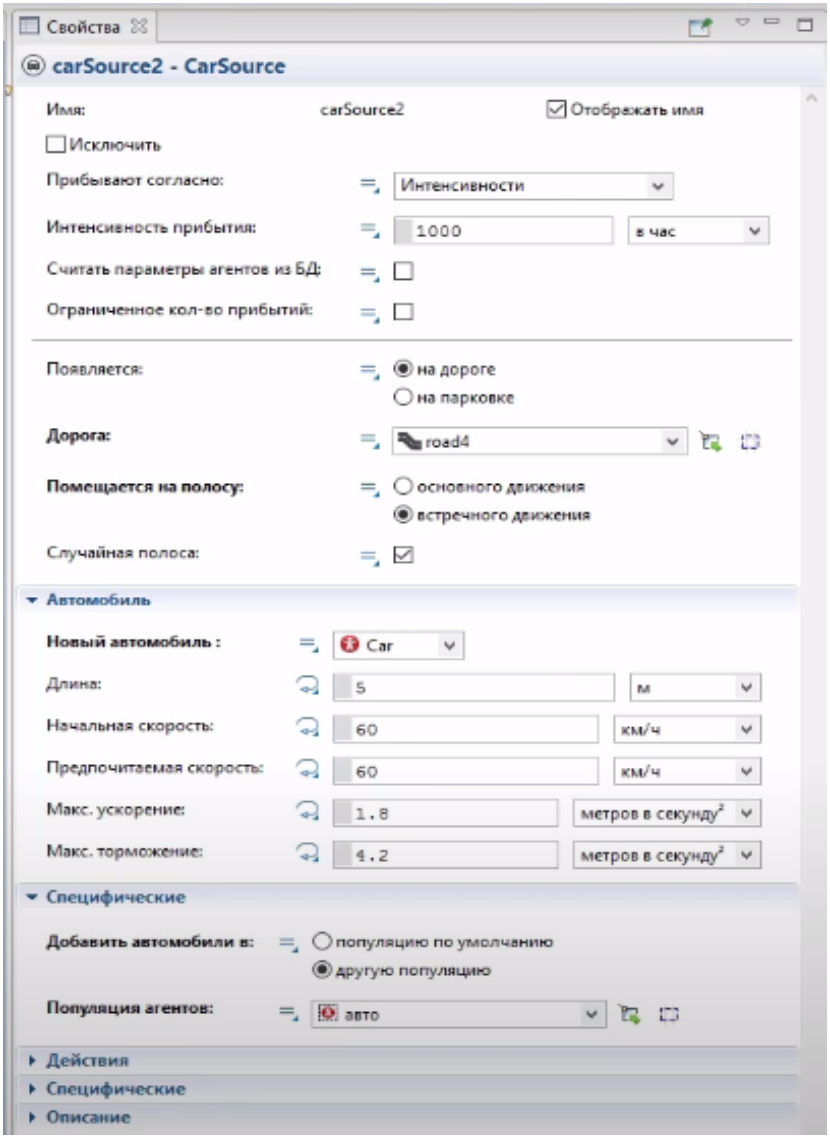


Рис. 7. Работа в программе «AnyLogic»

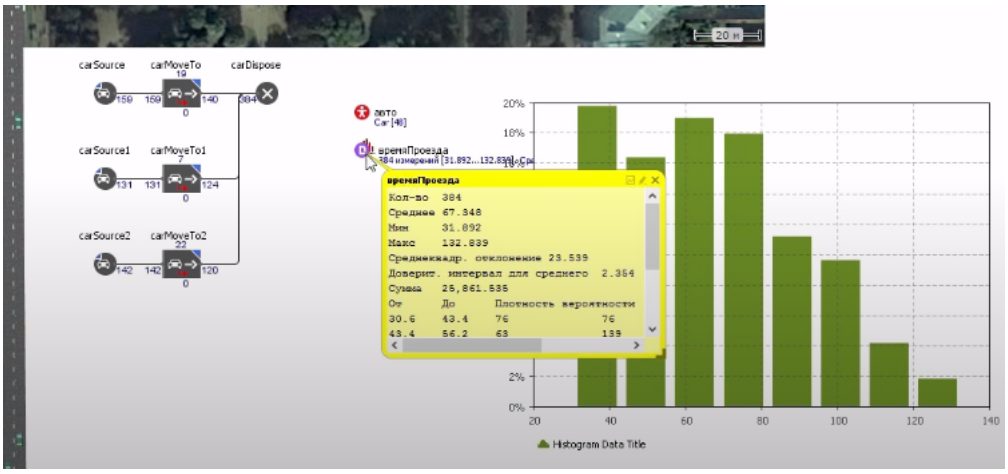


Рис. 8. Работа в программе «AnyLogic», запуск программы

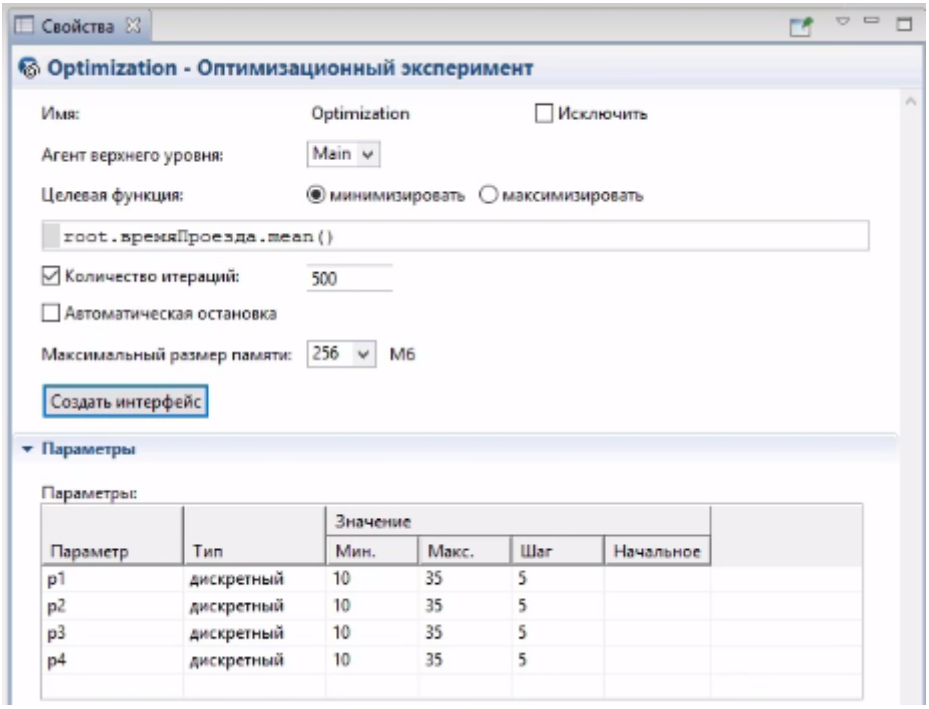


Рис. 9. Работа в программе «AnyLogic»

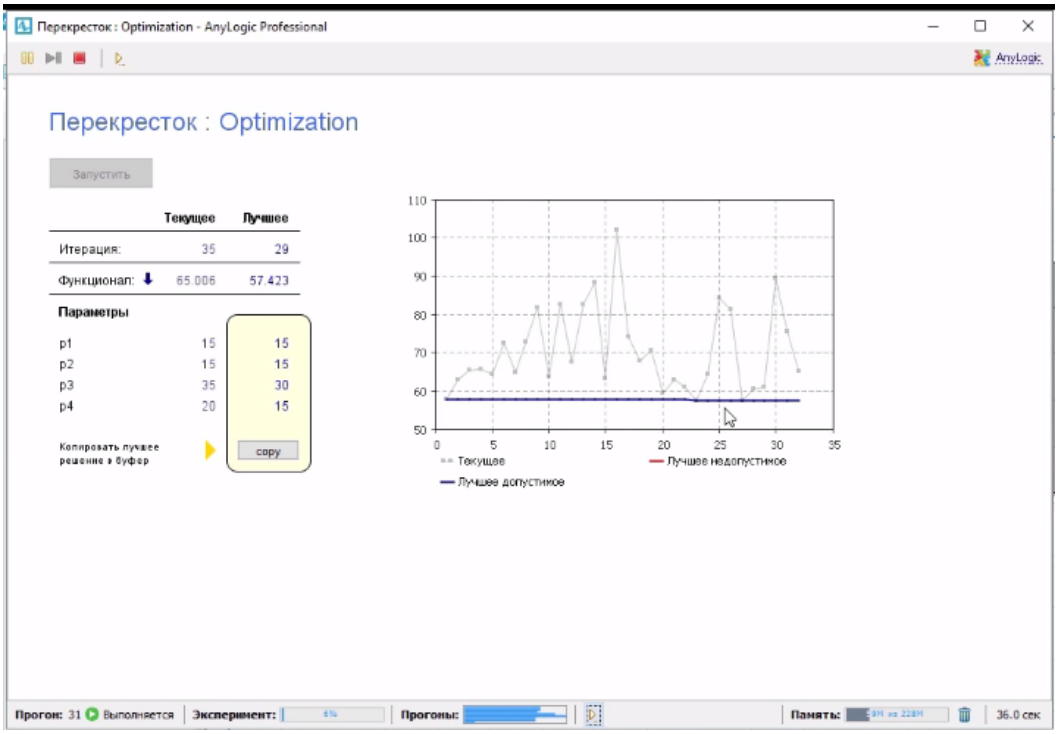


Рис. 10. Работа в программе «AnyLogic»

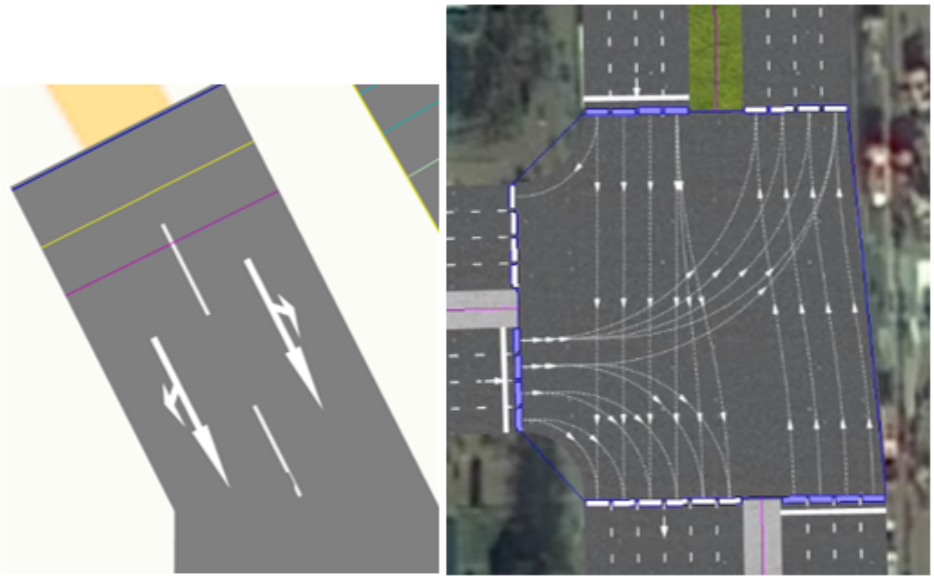


Рис. 11. Регулировка движения соответственно в «PTV Vision Vissim», и «AnyLogic»

Заключение

Исходя из описанных выше свойств каждой программы, можно сделать следующее заключение: главными достоинствами программы «PTV Vision Vissim» являются ее простота и наглядность, для ее использования не нужно знать языков программирования, в этой программе можно проводить анализ участка дорожной цепи, равно как и в «AnyLogic», однако для более тщательного анализа следует использовать вторую программу. Важной особенностью «AnyLogic» является детализация за счет поддержки агентного моделирования, благодаря чему повышается точность при моделировании, а также в программе можно создать эксперимент оптимизации, основанный на механизме «OptQuest», автоматически находящий лучшие параметры модели с учетом заданных ограничений [4].

Библиографический список

1. Транспортное планирование. PTV VISUM. PTV VISSIM. URL: www.ptv-vision.ru (дата обращения: 20.11.2022).

2. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: www.anylogic.ru (дата обращения: 20.11.2022).

3. Вебинар: моделирование дорожного движения в AnyLogic 7.3 – YouTube URL: https://www.youtube.com/watch?v=si-KCX1GyY0 (дата обращения: 29.11.2022).

4. Моделирование транспортных потоков. Транспортное моделирование дорожного движения. Промтерра URL: https://www.prom-terra.ru/uslugi/transportnoe-modelirovanie/ (дата обращения: 22.11.2022).

УДК 658.628.011.1 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-189-197**

А. А. Козлов*
магистрант
С. А. Андронов*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ТИПИЗАЦИЯ МАГАЗИНОВ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В статье рассматривается проблема категорийного менеджмента и вариант типизации магазинов с применением алгоритмов машинного обучения в среде Loginom, KNIME и AutoML-FEDOT. Вводится понятие транзакционного набора. Разработано предложение по типизации магазинов. Проведено сравнение решений по кластеризации ассортимента. Было выявлено оптимальное для данных условий количество ассортиментных кластеров, равное трем. Проведена кластеризация транзакций с помощью алгоритма CLOPE, наиболее качественно прошло разделение при девяти кластерах при коэффициенте отталкивания 1,1. При помощи нейросетевых методов, методов машинного обучения и AutoML найдено решение задачи классификации транзакционного набора. Лучшее решение было найдено в AutoML-FEDOT, оно представляет собой ансамбль методов со значением ROC-AUC = 0,908.
Ключевые слова: *категорийный менеджмент, машинное обучение, классификация, анализ транзакций.*

A. A. Kozlov*
Postgraduate Student
S. A. Andronov*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STORE TYPING WITH MACHINE LEARNING

The article discusses the problem of category management and the option of typing stores using machine learning algorithms in the Loginom, KNIME and AutoML-FEDOT environments. The concept of a transactional set is introduced. A proposal for the typification of stores has been developed. A comparison of solutions for assortment clustering is carried out. The optimal number of assortment clusters for these data was found to be 3. Clustering of transactions was carried out using the CLOPE algorithm, the separation was most qualitatively carried out with 9 clusters with a repulsion coefficient = 1.1. With the help of neural network methods, machine learning methods and AutoML, a solution to the transactional set classification problem has been found. The best solution was found in AutoML-FEDOT and is an ensemble of methods with a value of ROC-AUC = 0.908.
Keywords: *category management, machine learning, classification, transaction analysis.*

Введение

Понятие категорийного менеджмента напрямую связано с понятиями точек сбыта, предоставляемого ассортимента и методов, как этот ассортимент определить и как определить товар, который будет уходить лучше [1]. Методы, на которые полагается данная наука, субъективны. Считается, что на решение данных задач отводится целый отдел, если речь идет о крупных сетях, и данная работа может быть еще эффективнее, если заранее знать, чего ожидать от того или иного товара или точки сбыта. Характеристики, которыми обладают магазины, можно использовать для качественного анализа, используя их сильные и слабые стороны. Если представить два идентичных по параметрам магазина, то можно предположить, какие товары будут продаваться в каждом из них: товары, категории, расположение этих товаров, ожидаемые наборы, что его отличает от других магазинов.

Проблема категорийного менеджмента

Проблема используемых сейчас методов в том, что для достижения результата их необходимо часто повторять. Так же, сложно систематизировать состояние и ассортимент магазинов спустя долгое время после их запуска, потребуется длительная и дорогостоящая работа отдела. Таким образом алгоритм, способный уменьшить ко-

личество работ, сможет существенно поднять эффективность отдела, так и снизить затраты на частые работы, которые будут не нужны.

Постановка задачи

В данной работе предлагается рассмотреть вариант, в котором для управления ассортиментом будет использован накопленный опыт магазинов. Зная сам магазин, его параметры, мы с высокой точностью предскажем, что будет содержаться в этом магазине и как в среднем он будет себя вести.

Характеризуя магазины параметрами, производится их систематизация, которая позволяет произвести группировку похожих по признакам магазинов.

Чтобы использовать параметры магазинов для управления ассортиментом, необходимо определить принадлежность магазинов к различным типам, а также разделить принадлежащие им транзакции на группы. Решение задачи классификации, примененное к определению группы транзакций для магазина с набором характеризующих параметров, позволит существенно ускорить процесс синтеза как новых точек сбыта, так и совершенствовать параметры существующих магазинов. Решение данных задач обеспечит систематизацию магазинов и прогнозирование их параметров в удобной для анализа форме.

Решение задачи предполагается выполнить с использованием следующих программных средств: Loginom [7], KNIME [8], AutoML-FEDOT [3].

Типизация магазинов

Классификацию магазинов можно провести следующим образом:

1. Номер магазина.
2. Местоположение – у дома, супермаркет, гипермаркет.
3. Оборот.
4. Тип – городской, сельский.
5. Ассортимент.
6. Территориальная концентрация – группа, отдельное.
7. Размещение – встроенный, пристроенный, отдельное здание, ТЦ.
8. Позиций в чеке.
9. Число человек на магазин.

Ассортиментный кластер – параметр, отличающийся количеством различных позиций в ассортиментной матрице.

Чем правильнее определен тип магазина, тем более точно можно определить ассортиментную матрицу, тем меньше работ необходимо устраивать в сфере определения ассортимента.

Для решения задачи классификации транзакционного набора магазина в данном случае необходимо иметь следующие параметры:

1. Количество категорий ассортимента. Определение параметра возможно на основе кластеризации.
2. Параметры результата ABC анализа. Провести градацию оборотов магазинов по ABC-анализу в среде Loginom и дать дискретную характеристику каждому магазину.
3. Число позиций в чеке. Это число необходимо знать для того, чтобы представлять возможную широту ассортимента.
4. Сколько человек приходится на один магазин. Чтобы определить верную группу транзакций, необходимо решить задачу классификации, в которой используются параметры магазинов и метка класса – транзакционный набор.

Транзакционный набор – набор действий потребителя, часто производимых им в определенном типе магазинов. Действия потребителя, разделенные по кластерам, могут подсказать, какие позиции схожи или различны в представленных типах магазинов, что объединяет товары в группу или в каких типах магазинов не характерны некоторые транзакции [2].

Присваивая магазину номер транзакционного набора, руководствоваться нужно понятием, что чем глубже и шире ассортимент магазина, тем глубже и шире могут быть транзакции, выполняемые потребителями. Поэтому, в рамках модельного эксперимента, транзакционные кластеры поставлены в соответствии с объемом ассортиментной матрицы.

Таким образом, итогом решения задачи будет набор меток, дополняющих тип магазина и прогнозирующий транзакционный набор как для создаваемых магазинов, так и позволяющий проанализировать существующие параметры.

Часть меток находится в непрерывном состоянии, которое для расчета дискретного значения, получаемого в ходе выполнения классификации, не является удобным. Поэтому, чтобы определить оптимальные метки, необходимо ранжировать непрерывные данные по диапазонам, разделение на которые предлагается производить с помощью ABC-анализа и кластеризации данных. Таким образом, будут получены удобные метки в небольшом количестве, которые затем просто интерпретировать на результаты классификации. Помимо этого, для магазинов будут отражены хорошие общие аналитические показатели.

Исходные данные

Итоговые данные представляют собой таблицы с метками вида (табл. 1).

ABC-анализ

Разработка ABC-анализа в low-code платформе Loginom представляет собой описание необходимых выражений в модуле “Калькулятор”. Отражены они будут следующим образом, предварительная настройка входных переменных имеет следующий вид (рис. 2).

Выражения имеют следующий синтаксис:

Выр_1: Oborot * 100 / Stat(«Oborot»,»Sum»)

Выр_2:CumulativeSum(“part”)

Выр_3:IF(cum_part<= a, “A”, IF(cum_part>= c, “C”, “B”))

Таким образом, проведя предварительную сортировку по обороту магазинов, посчитаем доля каждого магазина (выр_1). Затем, используя функцию накопительной суммы (CumulativeSum), посчитаем накопительную долю магазинов (выр_2), и дальше, воспользовавшись сравнением показателей, присвоим каждому показателю метку(выр_3) [6].

Результатом этого будет новый выходной атрибут-метка, ранжирующий оборот магазинов по понятным категориям (рис. 3).

Кластеризация ассортимента

Проведем кластеризацию данных по атрибуту Ассортимент (непрерывный), мастер-настройка включает в себя только лишь один аргумент (рис. 4).

Решение задачи кластеризации необходимо производить с целью ранжирования количественной составляющей ассортимента. Возникает проблема определения наиболее точного разделения ассортимента на количественные группы. Ввиду небольшого объема, простоты данных и только числовой их формат, воспользуемся следующими методами: метод k-means и его разновидности, самоорганизующаяся сеть Кохонена и иерархический метод кластеризации. Методы хорошо себя чувствуют с вышеописанными типами данных, и простота их вычислений позволит не тратить много времени на поиск оптимального решения [4].

Ввиду того, что задачу предлагается решать исходя из положения, что мы не понимаем количество оптимальных кластеров, решение необходимо начать с именно иерархической кластеризации с целью определить общий вид данных и их структуру. На рис. 5 представлена дендрограмма данных, построенная на основе дендрограммы в пакете KNIME. Листья, которые являются слияниями наблюдений, образуют

Таблица 1

Метки таблицы с данными магазинов

Номер	Место	Оборот	Тип	Ассор.	Концент.	Размещ.	Поз. в чеке	Чел. на маг.
1	У дома	239741	Сельский	2085	Отдельно	Встроенный	2	208559
2	У дома	324020	Городской	2956	Отдельно	Встроенный	2	208559
3	У дома	218391	Сельский	1087	Отдельно	Встроенный	2	208559
4	У дома	273444	Городской	2715	Отдельно	Встроенный	3	263181

```
"TRANSACTION_DT","CUSTOMER_ID","AGE_GROUP","PIN_CODE","PRODUCT_SUBCLASS","PRODUCT_ID","AMOUNT","ASSET","SALES_PRICE"
"11/1/2000","01104905","45-49","115","110411","4710199010372","2","24","30"
"11/1/2000","00418683","45-49","115","120107","4710857472535","1","48","46"
"11/1/2000","01057331","35-39","115","100407","4710043654103","2","142","166"
"11/1/2000","01849332","45-49","Others","120108","4710126092129","1","32","38"
"11/1/2000","01981995","50-54","115","100205","4710176021445","1","14","18"
"11/1/2000","01741797","35-39","115","110122","0078895770025","1","54","75"
"11/1/2000","00308359","60-64","115","110507","4710192225520","1","85","105"
"11/1/2000","01607000","35-39","221","520503","4712936888817","1","45","68"
"11/1/2000","01057331","35-39","115","320203","4715398106864","2","70","78"
"11/1/2000","00236645","35-39","Unknown","120110","4710126091870","1","43","53"
```

Рис. 1. Метки таблицы с данными о транзакциях

9.0 A	a	Используемое	80,00
9.0 C	c	Используемое	95,00

Рис. 2. Входные переменные для ABC-анализа

ab ABC	ab Местоположение	ab Тип	9.0 Ассортимент(непрерывный)	12 людей	12 магазинов
B	удома	Сельский	1580,584124	1187771	1
A	удома	Городской	1031,983398	601993	1
C	удома	Городской	2853,572192	437456	1
B	удома	Городской	1132,938627	425950	1

Рис. 3. Результат выполнения ранжирования по ABC-анализу

Метка	Имя	Вид данных	Назначение
9.0 Ассортимент(непрерывный)	Assortiment_nepreryvniy_	Непрерывн...	Используемое

Рис. 4. Настройка входных атрибутов кластеризации

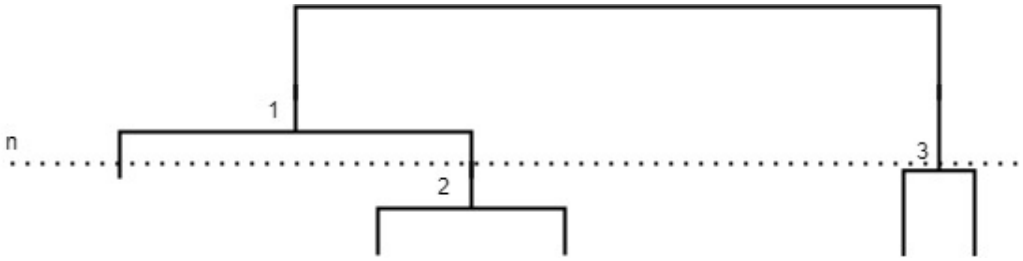


Рис. 5. Дендрограмма данных

ветви, обозначенные на рисунке цифрами *1*, *2* и *3*, каждая из которых представляет собой кластер. Ниже высоты *n* наблюдения образуют 3 различные группы.

Остановимся на 3 кластерах, проверим, что предложат реализации методов кластеризации в среде Loginom и KNIME, результаты представлены в табл. 2.

Выполняя настройку метода g-means в среде Loginom, можно определить, что, меняя значение порога разделения от 0,1 до отметки в 3,5, количество кластеров изменяется с 10 до 7 с редким уменьшением. Начиная с порога разделения – 3.5, алгоритм определяет 3 кластера.

Выполняя настройку метода EM-кластеризации в среде Loginom, можно заметить, что оптимальный результат с тремя кластерами достигается при пороге разделения от 3.1.

Среди нейросетевых методов при уже определенном количество кластеров в рассмотрении использована сеть Кохонера в среде Loginom, результаты представлены в табл. 2.

В среде KNIME выполнена кластеризация ассортимента следующими методами: k-means и c-means.

Подводя итог решения задачи, ориентируясь на результаты в табл. 2, лучшим выглядит вариант с тремя кластерами с центроидами возле 2000,6000 и 40000 позиций ассортимента. Лучше других показал себя метод c-means в среде KNIME ввиду высокой скорости, понятной интерпретации и с наиболее удаленными друг от друга центроидами кластеров. Таким образом, в среднем магазину у дома соответствует кластер с центроидой возле 2000, супермаркету возле 6000, а гипермаркету с его разнообразным ассортиментом 40000. Данное разделение позволяет удобно типизировать ассортимент.

Результат распределения кластеров на исходных данных (табл. 2).

Таблица 2

Центры кластеров

K-means/g-means (Loginom)	k-means (KNIME)	c-means (KNIME)	EM (Loginom)	Koh (Loginom)
42917	42997	43026	42997	42997
6335	6297	6313	6201	6297
2252	2168	2135	2159	2168

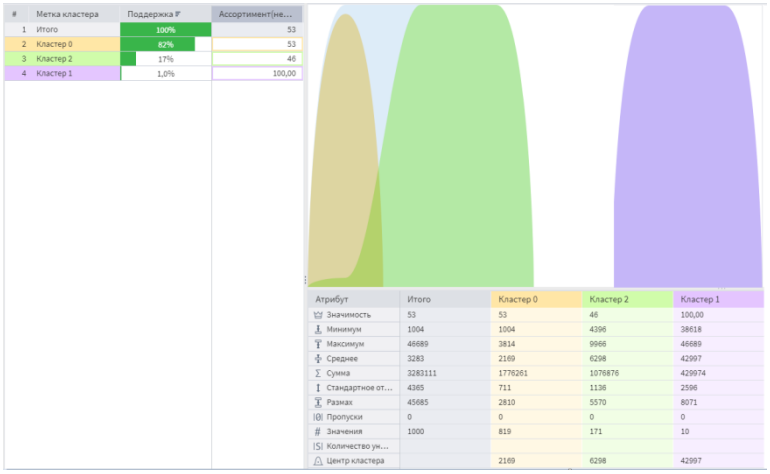


Рис. 6. Визуализация кластеров

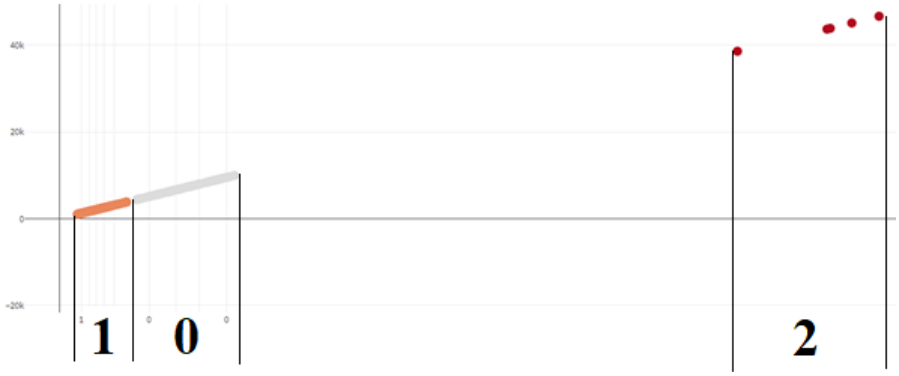


Рис. 7. Точечное представление кластеров

На рис. 6 представлена визуализация относительных частот кластеров.

На рис. 7 представлено положение кластеров в пространстве. Кластер, наиболее удаленный от начала координат и отмеченный цифрой 2, заметно выделяется. Кластеры, отмеченные цифрами 0 и 1 достаточно близки друг к другу.

Кластеризация транзакций

При обработке больших объемов данных популярные методы кластеризации теряют в показателях. Скорость получения результатов снижается, и результат становится непредсказуемым. Для обработки подобных массивов данных был предложен алгоритм, смысл которого был бы в масштабировании и сильном увеличении скорости обрабатывания информации. Таким стал алгоритм CLOPE [2], разработанный и получивший широкое распространение относительно недавно. Для исследования транзакций покупателей воспользуемся данным алгоритмом [2].

Параметры метода включают в себя такие понятия, как ширина, объем и высота. Данные понятия хорошо характеризуют кластеры или транзакционные группы в данном случае и позволяют оценить их с точки зрения интерпретации в решаемой задаче.

Чтобы правильно обработать транзакции и разделить их в кластеры, преобразуем входные данные:

Необходимо, чтобы транзакции одного покупателя в момент времени находились в одной строке. Чтобы задачу решить быстро и эффективно, отслеживая процесс, воспользуемся модулем Power-Quary в программе Excel, написав нужный запрос.

Формула для необходимого агрегирования:

= Table.Group(#”Changed Type”,
{“CUSTOMER_ID”,”TRANSACTION_DT”},

{{“PRODUCT_SUBCLASS”, each Text.
Combine([PRODUCT_SUBCLASS], “, “),
type text}})

Таким образом, транзакции приобретают следующий вид (рис. 8).

CUSTOMER_ID	TRANSACTION_DT	PRODUCT_SUBCLASS
1004373	01.11.2000	715911, 110401, 110401, 110401, 110411, 110401, 110411
1009903	01.11.2000	130302, 120108
101981	01.11.2000	110411, 100205, 130316, 100323, 110411, 100205, 110507, 100305, 120109, 110109, 100323, 130305, 1003

Рис. 8. Метки сведенных транзакций

Агрегация произошла по полям покупателя и даты покупки, нюанс разделения по дате понадобится в будущем при обработке непосредственно транзакций, позволит это отследить динамику и частоту упоминаний различной продукции.

Используя метод CLOPE на транзакционных данных, определим, сколько кластеров будет найдено и какие у них параметры. Важно понимать, что площадь кластеров должна характеризовать объем ассортиментной матрицы магазинов, в которых эти кластеры имеют место быть. Ввиду простого утверждения, что чем больше ассортимент магазина, тем выше может быть вариативность позиций в чеке. Алгоритм CLOPE в результате представляет ряд характеристик: ширина, высота и площадь. Ширина представляет количество уникальных товарных групп, а высота – глубину представления этих групп. Площадь представляет собой умножение двух этих характеристик. Если в кластере представить число упоминаний товарных групп в зависимости от параметра высоты кластера, то можно заметить, что два этих параметра пропорциональны друг другу. И, следовательно, чем чаще упоминается товарная группа, тем больше в нем товарных позиций данной группы.

Несмотря на достоинства алгоритма, он не может обработать даже 120000 строк, поэтому воспользуемся семплированием до 30% от общей группы методом случайного деления на группы. Самым качественным разделением получился вариант с коэффициентом отталкивания = 1,1 и установленным числом кластеров = 9.

На рис. 9 представлен результат выполнения алгоритма.

#	12 Номер кластe...1	12 N	12 W	12 S
1	0	2262	2433	3248
2	1	2902	3562	4106
3	2	2937	11051	11553
4	3	2810	3316	3923
5	4	866	63	1035
6	5	287	75	350
7	6	2923	3675	4169
8	7	2763	6134	6518
9	8	513	412	971

Рис. 9. Мощность кластеров транзакций

Данное разделение отражает поведение магазинов с различными характеристиками, где сельский магазин, очевидно, не имеет той же широты ассортиментной матрицы, а ассортимент супермаркета и гипермаркета может отличаться только широтой (W), поэтому полученные результаты можно считать удовлетворительными.

Классификация набора транзакций

Соединяя полученные результаты, данных становится достаточно для проведения классификации с целью прогнозирования транзакционного набора.

Было выполнено сравнение результатов классификации, полученных с помощью вышеназванных программ.

В Loginom обучение нейросети происходит методом Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно [5]. Результаты выполнения в среде Loginom: на рис. 10 видно, что ошибка на тестовом множестве – 58%.

На рис. 11 представлен сценарий Loginom для решения поставленных задач.

В KNIME были применены следующие методы классификации в следующем порядке:

- Метод ближайшего соседа;
- Градиентный бустинг;
- Случайный лес;
- Дерево решений.

Результаты выполнения в среде KNIME по методам выглядят так:

- Ближайший сосед – 76% ошибок;
- Градиентный бустинг – 66%;
- Случайный лес – 70%;
- Дерево решений – 70%.

Результаты неудовлетворительные, но надо отметить, что такие алгоритмы как градиентный бустинг и случайный лес демонстрируют достаточно близкие результаты. Если в тестовых данных стоял кластер, который имел характеристики 2902,3562,4106 (N,W,S), то классификация часто определяет схожий ему кластер, вроде 2810,3316,3923.

Используя AutoML-FEDOT, способного находить решение на основе автоматизированного машинного обучения, задача может быть решена более качественно. Чтобы избежать проблем с балансированием классов, дополним данные до

№	Имя	Метка	Значение
1	12 TotalSamples	Всего примеров	1 000
2	12 TotalSelectedSamples	Всего отобранных примеров	1 000
3	12 TrainSamples	Примеров в обучающем множестве	950
4	9.0 TrainRMSError	Среднеквадратическая ошибка на обучающем множестве	0,29
5	9.0 TrainClsErrorPercentage	Процент ошибок классификации на обучающем множестве	67,47
6	9.0 TrainAvgCE	Средняя перекрестная энтропия на обучающем множестве	0,81
7	12 TestSamples	Примеров в тестовом множестве	50
8	9.0 TestRMSError	Среднеквадратическая ошибка на тестовом множестве	0,28
9	9.0 TestClsErrorPercentage	Процент ошибок классификации на тестовом множестве	58,00

Рис. 10. Результат обработки в Loginom

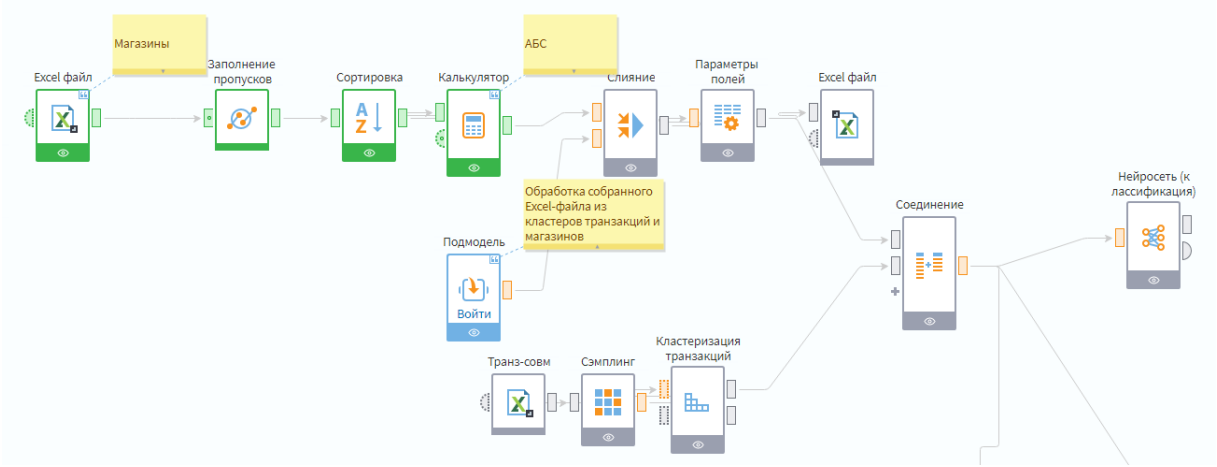


Рис. 11. Сценарий Loginom

	kategorAso	abc	mestopol	tip	koncentr	razmesh	posinchek	chelnamagaz	tranzklast
0	1	A	супермаркет	Городской	Отдельно	Отдельное зд	11	17957.14286	0
1	1	A	супермаркет	Городской	Группа	Отдельное зд	9	27274.86792	0
2	0	A	супермаркет	Городской	Группа	Отдельное зд	3	27274.86792	0
3	0	A	супермаркет	Городской	Отдельно	ТЦ	3	55413.72222	0
4	1	A	супермаркет	Городской	Группа	Встроенный	4	27274.86792	0
5	0	A	супермаркет	Городской	Отдельно	Пристроенный	3	55413.72222	0
6	1	A	супермаркет	Сельский	Отдельно	Встроенный	7	27274.86792	0
7	1	A	супермаркет	Городской	Отдельно	Пристроенный	3	18836.48148	0
8	1	A	супермаркет	Сельский	Отдельно	Встроенный	4	27274.86792	0
9	0	A	супермаркет	Городской	Отдельно	Пристроенный	3	18836.48148	0

Рис. 12. Представление датасета

нужной размерности классов. Таким образом, мы получаем 2800 строк с параметрами магазинов, с которыми классы будут достаточно сбалансированы, чтобы не вызывать проблем.

Исходный код в среде Jupyter-notebook выглядит следующим образом [3]:

```
import pandas as pd
df = pd.read_csv('tyyt2.csv')
df.head(10)
```

```
Import fedot
from fedot.api.main import Fedot
from fedot.core.data.data_split import train_test_data_setup
from fedot.core.data.multi_modal import MultiModalData
data = MultiModalData.from_csv(file_path='tyyt2.csv', task='classification', target_columns='tranzklast', index_col=None)
```

```
fit_data, predict_data = train_test_data_setup(data, shuffle_flag=True, split_ratio=0.7)
automl_model = Fedot(problem='classification', timeout=10, seed=42)
automl_model.fit(features=fit_data,
                 target=fit_data.target)
prediction = automl_model.predict(predict_data)
metrics = automl_model.get_metrics()
metrics
automl_model.plot_prediction()
```

На рис. 15 представлена визуализация качества найденного решения, в среднем качество найденной модели составляет 90,8% – вероятность верно определить объект.

```
automl_model.current_pipeline.print_structure()
```

Структура ансамбля:

{'depth': 4, 'length': 4, 'nodes': [rf, rf, poly_features, data_source_table]}:

- rf – {'n_jobs': 1, 'bootstrap': True, 'criterion': 'gini', 'max_features': 0.2943253416663353, 'min_samples_leaf': 4, 'min_samples_split': 5, 'n_estimators': 100};
- rf – {'n_jobs': 1, 'bootstrap': False, 'criterion': 'gini', 'max_features': 0.12652301520558323, 'min_samples_leaf': 1, 'min_samples_split': 2, 'n_estimators': 100};
- poly_features – {'degree': 4, 'interaction_only': True};
- data_source_table – {}.

Найденная структура ансамбля ввиду высоких показателей качества может быть использована в реальной задаче.

В отличие от методов, которые использовались выше, решение может быть найдено быстро и качественно. Отпадает необходимость настройки параметров и в их оптимизации. Полученный результат подтверждает факт того, что в зависимости от условий и параметров, в которых находятся магазины, можно предсказать их транзакции, что открывает доступ к анализу. Решение можно использовать не только для открытия новых точек, но и более качественному предсказанию параметров уже существующих магазинов, ориентируясь на показатели других магазинов.

Заключение

Была предложена типизация магазинов и проведено ранжирование показателей оборота магазина с помощью методов ABC-анализа и ассортимента с помощью кластеризации. Наи-

```
2022-11-07 16:39:07,179 - ApiComposer - Hyperparameters tuning finished
2022-11-07 16:39:07,236 - ApiComposer - Model generation finished
2022-11-07 16:39:07,744 - FEDOT logger - Final pipeline was fitted
2022-11-07 16:39:07,745 - FEDOT logger - Final pipeline: {'depth': 4, 'length': 4, 'nodes': [rf, rf, poly_features, data_source
_table]}

{'depth': 4, 'length': 4, 'nodes': [rf, rf, poly_features, data_source_table]}
```

Рис. 13. Структура найденного решения

```
{'roc_auc': 0.908, 'f1': 0.6023168349496393}
```

Рис. 14. Качество найденного решения

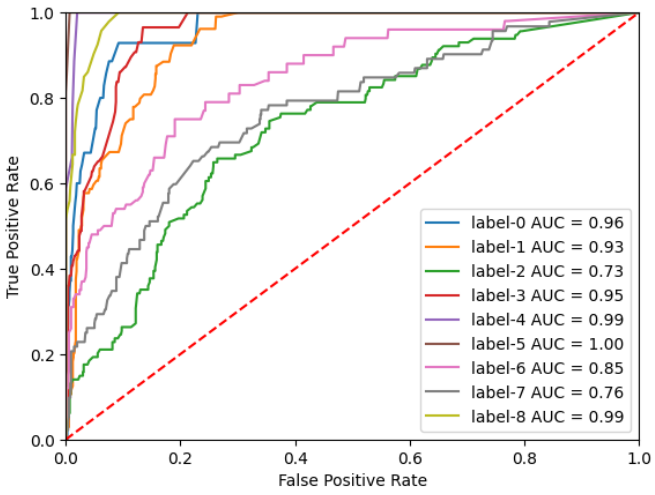


Рис. 15. ROC-AUC кривая

более качественный результат в задаче кластеризации ассортимента показал алгоритм C-means ввиду наиболее удаленных центроидов кластеров. Транзакции, проводимые в магазинах, с помощью алгоритма CLOPE разделены на кластеры. Получены транзакционные наборы, которые отражают общее поведение магазина, а также указывающие на параметры, которыми обладают их ассортиментные матрицы. Проведено решение задачи классификации транзакционного набора по меткам магазина несколькими методами. Лучшее решение было найдено в AutoML-FEDOT и представляет собой ансамбль методов со значением ROC-AUC = 0,908, что позволяет с высокой вероятностью верно определять экземпляры данных.

Подводя итог, решенная задача классификации позволит в реальных данных точно классифицировать не только сами магазины и их параметры, но и содержание этих самых магазинов, в том числе какие транзакции, вероятнее всего, будут сопутствовать работе точки. Таким образом, в данном модуле проведена работа по определению меток, характеризующих магазин, и построению классификации транзакционного набора, отражающего поведение потребителей.

Интерес к типизации магазинов и прилагаемым к ней решенным задачам обусловлен тем, что даже такой базис, как определение транзакционного набора магазина и его разметка по типу способно уменьшить количество производимых работ, которые можно автоматизировать, но сложно оптимизировать в условиях устоявшихся алгоритмов. Свежий взгляд, используя предсказательные модели, позволит сократить количество рутинных работ и добавить наглядности выполняемым процессам, где затем можно производить оптимизацию относительно старых процессов.

Библиографический список

1. *Киселев В. М., Николаева М. А.* Категорийный менеджмент: учеб. пособие. М.: 2012. 227 с.

2. Scalable CLOPE algorithm for clustering categorical data. URL: https://loginom.ru/blog/ clope/ (дата обращения: 20.09.2022).

3. FEDOT Tutorial – Multimodal. URL: https://fedot.readthedocs.io/en/latest/index.html (дата обращения: 01.11.2022).

4. *Нейский И. М.* Методика адаптивной кластеризации фактографических данных на основе интеграции методов минимального остовного дерева и нечетких К-средних: диссертация. М.: МГТУ, 2010. 185 с.

5. Классификация данных при помощи нейронных сетей. URL: https://loginom.ru/ blog/neural-classification (дата обращения: 10.10.2022).

6. ABC XYZ – анализ продаж для умного управления бизнесом. URL: https://logi-nom.ru/blog/abc-xyz (дата обращения: 10.09.2022).

7. Loginom Community Edition. URL: https://loginom.ru (дата обращения: 10.08.2022).

8. KNIME Analytics Platform. URL: https://www.knime.com/knime-analytics-platform (дата обращения: 15.10.2022).

УДК 656.07 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-198-203**

А. С. Костин*
ассистент
А. А. Горелова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ КВАДРОКОПТЕРА

В статье описаны особенности организации доставки грузов при помощи беспилотных авиационных систем в рамках доставки груза до дронпоинта. Приведена модель организации доставки груза и приведен пример листинга программного кода с отладкой программы автономного полета квадрокоптера в симуляционной среде Gazebo с формированием специального отладочного мира.
Ключевые слова: *беспилотные авиационные системы, доставка грузов, автономный полет, дронпоинт.*

A. S. Kostin*
Assistant
A. A. Gorelova*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF CARGO DELIVERY USING AN UNMANNED AERIAL SYSTEM BASED ON A QUADROCOPTER

The article describes the features of organizing the delivery of goods using unmanned aerial systems as part of the delivery of goods to the dronepoint. A model of the organization of cargo delivery is given and an example of listing the program code with debugging the quadrocopter autonomous flight program in the Gazebo simulation environment with the formation of a special debug world is given.
Keywords: *unmanned aerial systems, cargo delivery, autonomous flight, dronepoint.*

Введение

Сегодня мы наблюдаем постоянное улучшение существующих городских транспортных систем. Это обусловлено ростом инфраструктуры за счет притока населения в мегаполисы, увеличением потребностей и темпов жизни людей. Однако необходимость совершенствования транспортных процессов создает почву для совершенно новых решений.

Транспортировка груза является неотъемлемой частью производственного и сбытового процессов. В условиях городской среды автомобильные грузовые перевозки создают дополнительную нагрузку на траффик, а также увеличивают конечную стоимость продукции с учетом затрат на топливо и оплаты человеческого труда.

Решением этого вопроса может стать использование беспилотных авиационных систем – развивающегося вида транспорта, который может осуществлять быструю и низкую по стоимости доставку малых грузов. Опыт применения БАС в других отраслях, таких, как строительство, энергетика, агропромышленность, доказывает их результативность, надежность и экономическую эффективность по сравнению с другой применяемой для этих целей техникой [1, 2].

Однако управление БАС до сих пор остается сложной задачей, зачастую требующей наличие оператора, контролирующего выполнение задания. Автоматизация отдельных процессов, в том числе выбора текущей задачи из предложенного списка заказов, поможет оптимизировать выполнение полетной миссии БАС с грузом на борту.

Задачи, решаемые беспилотными авиационными системами

Гражданские БВС находят применение практически во всех сферах жизни и решают большое

количество задач. Многие из них используются в случаях, когда выполнение задачи может быть связано с угрозой жизни человека или невозможностью сообщения с помощью других видов транспорта (рис. 1).

Аэрофотосъемка и аэровидеосъемка объектов

Это наиболее востребованный вид работ, выполняемых с воздуха. Беспилотники применяют как в кинематографии, коммерческой съемке, так и в личных целях, с определенными ограничениями. Современные камеры, устанавливаемые на БВС, обладают хорошей разрешающей способностью и отличным качеством картинки, что позволяет получать отличные кадры с воздуха. В совокупности с возможностью зависания в воздухе, быстрого и гладкого полета, беспилотник превращается в профессиональную фото- или видеокамеру [1, 2].

Работы с целью транспортировки малых грузов

В 2019 году DHL Express, мировой лидер в области международной логистики и экспресс-доставки, реализовала программу совместного запуска полностью автоматизированного программируемого решения по доставке дронами, что было призвано решить текущие задачи доставки на «последней миле» в городских районах Китая [1, 2].

Новейший беспилотник доставил первый груз клиенту DHL в Гуанчжоу. Для этого был специально разработан новый маршрут длиной около 8 км от сервисного центра DHL до места назначения. Для совершения полета было использовано беспилотное воздушное судно нового поколения из серии Falcon производства EHang. По данным эксперимента на маршрут БЛА потребовалось 8 минут (автомобиль совершает поездку по данному маршруту за 40 минут). Расходы на доставку снижаются на 80%, также заметен положительный эффект для экологии – значительно сокращается потребление энергии и углеродный след [2, 3].

Описание метода оптимизации доставки грузов при помощи БАС

Организация доставки груза состоит из этапов выбора вида транспорта, способа транспортировки и транспортного средства. На выбор транспортного средства влияют:

– Характер груза.
– Количество отправляемых партий.
– Срочность доставки груза заказчику.
– Местонахождение пунктов отправки и назначения с учетом климатических и сезонных характеристик.
– Расстояние, на которое перевозится груз.
– Ценность груза.
– Близость расположения точки доставки к транспортным коммуникациям.

Подразумевая, что выбор транспортного средства пришелся на БВС, опишем условия, которым должна соответствовать перевозка:

– Для конкретизации будем принимать вес беспилотника не более 10 кг вместе с полезной нагрузкой. На практике по опыту проектов доставки в разных странах, вес груза находится в

Рис. 1. Доли мирового рынка услуг БАС по отраслям за 2021 год [29]

пределах 2,5 кг. Объем груза не должен превышать размеры специального бокса для перевозки и не должен мешать осуществлению полета.

– Целесообразна отправка единичных товаров или маленьких партий.

– Срочная доставка.

– Пункты отправки и назначения находятся в одинаковых климатических и сезонных условиях.

– Перевозка экономически целесообразна, если ее стоимость в сравнении с транспортировкой другим видом транспорта меньше с учетом затрат вследствие потери или повреждения груза.

– Склады отправки, точки доставки, станции подзарядки и хранения БВС должны находиться в пределах максимальной дальности полета БВС.

Основными факторами при решении транспортной задачи по доставке груза от точки склада к потребителю являются расстояние от исходной точки, емкость аккумулятора БВС и время ожидания получателя [4].

Таблица 1

Условные координаты точек доставки

Точка	Координата по оси *x*	Координата по оси *y*
H	0	0
2	10	0
3	8	–4
4	5	5
5	–3	0
6	–4	4
7	–3	–3

Рассмотрим транспортную задачу, представленную на рис. 2. Изображенный граф содержит «точку дома» *H*, в которой находится дрон, и шесть потребителей (2-7), координаты которых определены.

Примем объем заряда аккумулятора $Q = 9$ у.е. При этом будем считать, что для преодоления одной условной единицы расстояния L необходима одна условная единица заряда аккумулятора.

Обозначим время ожидания заказа потребителем через t_0.

Расстояния между исходной точкой *H* и потребителями 2-7 на графе определим по формуле:

$$K_{x,y,z} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}, \quad (1)$$

где x_0, y_0, z_0 – начальные координаты квадрокоптера, x_1, y_1, z_1 – координаты для доставки грузов.

С учетом полученных расстояний мы можем увидеть, что точки *2* и *3* находятся вне досягаемости БВС из-за нехватки заряда (рис. 3).

С учетом времени ожидания каждого из потребителей, точка *7* должна быть обслужена в первую очередь.

Далее выполним программную реализацию автономного полета квадрокоптера COEX Clever 4 в имитационной среде Gazebo.

В рамках рассмотренного примера построения маршрута доставки груза квадрокоптером разрабо-

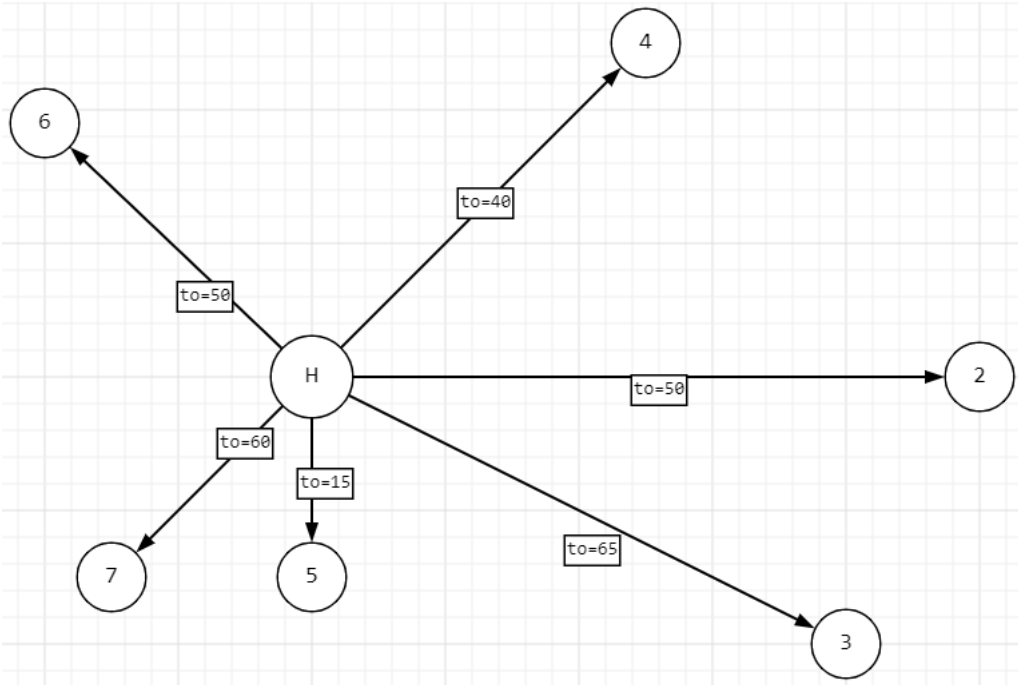


Рис. 2. Транспортная задача выбора оптимального пути БВС при доставке груза

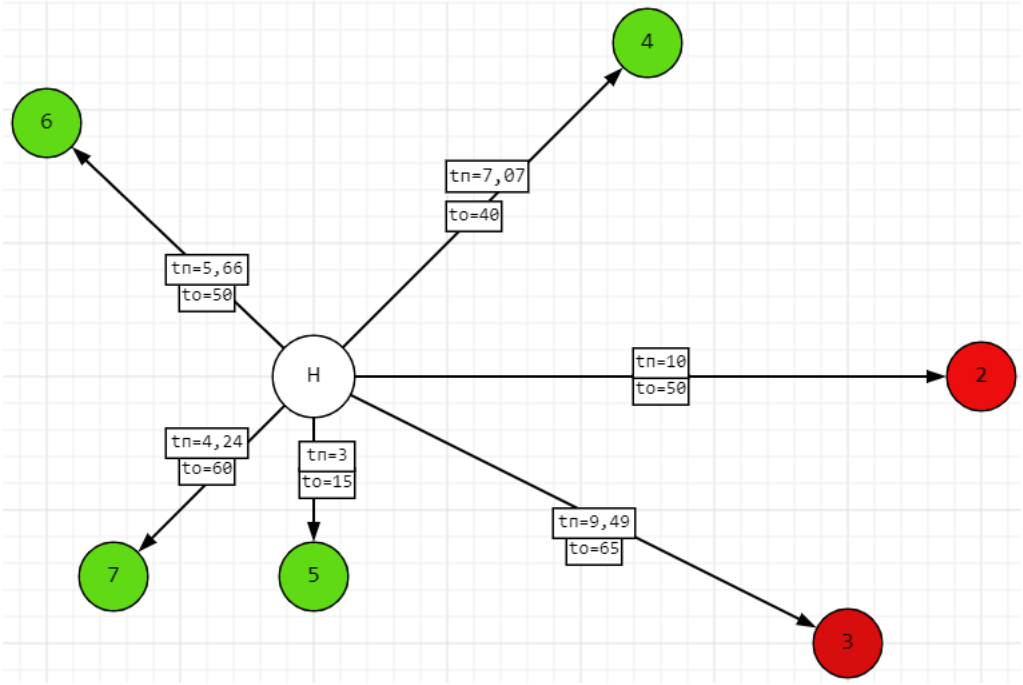


Рис. 3. Потребители, находящиеся в зоне обслуживания БВС

таем программное обеспечение, которое позволит выполнить следующие действия [8, 9, 10] (рис. 4):

1. Выполнить автономный взлет квадрокоптера.

2. Построить кратчайший маршрут движения квадрокоптера в заданные координаты доставки.

3. Выполнить посадку с выгрузкой доставляемого груза в точке посадки.

4. Выполнить взлет квадрокоптера с точки доставки с выполнением возврата в стартовую точку и посадкой на ней.

5. Выполнять доставку грузов до того момента, пока заряда аккумулятора достаточно.

Беспилотная авиационная система должна рассчитать стоимость пути от стартовой точки и до точки доставки, также необходимо учитывать то, что после каждой доставки квадрокоптером заряд аккумулятора снижается. Для расчета стоимости пути применяется следующий фрагмент исходного кода [5, 6, 7]:

```
def path():
    global dist,points
    points = [[0,0],[3.5,0.5],[2,1.5],[0.5,2.5],[0,0]]
    dist = []
    for i in range(len(points) – 2):
        dist1 = math.sqrt((points[0][0] – points[i+1][0])**2 + (points[0][1] – points[i+1][1])**2)
        dist.append(round(dist1,2))
    print('Points delivery:', points)
    print('Range to points delivery', dist)
```

После расчета дрон должен автономно выполнить взлет, полет до точки доставки, распознавание груза для доставки, посадку и затем полет обратно на начальную точку. Данные операции выполняются при помощи следующего фрагмента исходного кода:

```
def quest():
        Q = 7
        for j in range(len(dist)):
                min_dist = min(dist)
                index_dist = dist.index(min_dist)
                print('Battery voltage:', Q)
                if min_dist < Q:
                        print('Flying to', index_dist + 1, 'point delivery')
                        navigate_wait(frame_id='body', auto_arm=True, yaw=float('nan'))
                        flying(points[index_dist + 1][0],points[index_dist + 1][1])
                        landing()
                        navigate_wait(frame_id='body', auto_arm=True,yaw=float('nan'))
                        rospy.sleep(1)
                        navigate_wait()
                        landing()
                        print('delivered')
                        Q = Q – min_dist
                        dist[index_dist] = 1000
                else:
                        print('low battery')
                        continue
```

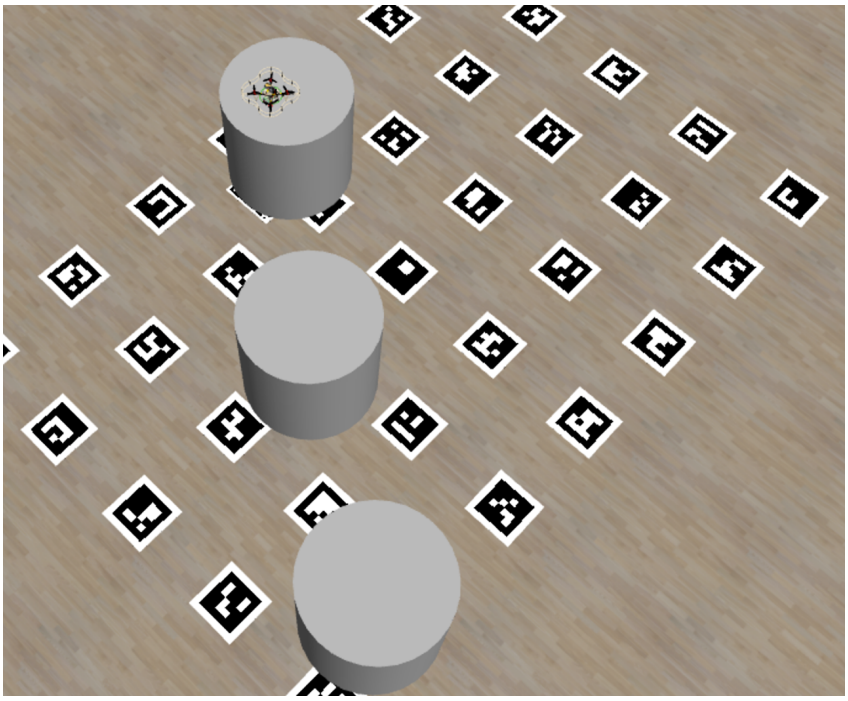


Рис. 4. Посадка на зону выгрузки, находящейся в зоне обслуживания БВС

```
Points delivery: [[0, 0], [3.5, 0.5], [2, 1.5], [0.5, 2.5], [0, 0]]
Range to points delivery [3.54, 2.5, 2.55]
Battery voltage: 7
Flying to 2 point delivery
b'phone'
delivered
Battery voltage: 4.5
Flying to 3 point delivery
b'phone'
delivered
Battery voltage: 1.9500000000000002
low battery
```

Рис. 5. Отчет о выполненной доставки грузов

После выполнения всего процесса доставки программное обеспечение публикует результаты выполнения автономного полета, где указывается остаточный заряд аккумулятора, точки доставки, в которые дрон выполнил автономный полет и те зоны, до которых доставить груз не удалось. Пример отчета приведен на рис. 5.

Заключение

Организация доставки грузов при помощи беспилотной авиационной системы лучше применять в тех случаях, когда между пунктами доставки нет прямого дорожного соединения и автотранспорт вынужден использовать объездные пути. Однако, моделирование проводилось в математически идеальных условиях: нет учета заторов и пробок, долгого ожидания на светофорах и погоды. И полученные результаты являются минимальными. В реальности же, при учете дорожной обстановки, доставка автомобилем может быть медленнее и будет наблюдаться значительное преимущество в скорости доставки беспилотной авиационной системой. На беспилотник не влияют светофоры и пробки.

Стоит иметь ввиду, что хоть эксплуатация беспилотника и может сократить как время доставки, так и транспортные издержки, законы на сегодняшний день обязывают к согласованию полета заранее в установленном порядке.

Библиографический список

1. Аналитики: Российский рынок дронов в 2021 году составляет 10 млрд рублей // Российская газета. URL: https://rg.ru/2021/12/09/analitiki-rossijskij-rynok-dronov-v-2021-godu-sostavliaet-10-mlrd-rublej.html (дата обращения: 10.11.2022).

2. Zipline – Instant Logistics. URL: https://flyzipline.com/global-healthcare/ (дата обращения: 10.11.2022).

3. Amazon Receives Patent for Drone Delivery System. URL: https://learningenglish.voanews.com/a/amazon-receives-patent-for-drone-delivery-system/2776033.html (дата обращения: 10.11.2022).

4. COEX Клевер 4 Code – конструктор программируемого квадрокоптера. URL: https://ru.coex.tech/clover (дата обращения: 10.11.2022).

5. *Suzuki S., Abe K.* Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Comput. Vis. Graph. Image Process. 1985. 30(1). P. 32–46.

6. *Markus H., Raffaello D'Andrea.* Quadro copter trajectory generation and control // IFACworldcongress. 2011. Vol. 18. No. 1. P. 1485–1491.

7. *Sezgin M., Sankur B.* Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // Electron Imaging. 2004. 13 (1). P. 146–165.

8. *Карпова Т. Ю., Костин А. С., Майоров Н. Н.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем: учеб. пособие / Под ред. Н. Н. Майорова. СПб.: ГУАП, 2021. 167 с.

9. *Еленин Д. В., Костин А. С., Майоров Н. Н.* Основы автономного управления беспилотными авиационными системами для решения транспортных задач: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2020. 71 с.

10. *Богатов Н. В., Костин А. С.* Управление и анализ полета квадрокоптера при задании сложной траектории движения // Системный анализ и логистика. Вып. 4 (26). СПб.: ГУАП, 2020. С. 3–12. ISSN 2077-5687.

УДК 681.5: 519.2: 658.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-204-210**

А. С. Костин*
ассистент
П. О. Завьялов*
магистрант
**Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛАСТИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРАМИ НА ОСНОВЕ РОССИЙСКОГО ИНДЕКСА НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ И БАЗЫ ДАННЫХ SCOPUS

В статье представлен анализ публикационной активности в области группового управления квадрокоптерами на основе базы данных Scopus и российского индекса научного цитирования (РИНЦ) с 2017 по 2021 год. Исследование публикаций проводилось при помощи программ VOSviewer и BIBLIOMETRIX. При помощи информационной системы публикаций были распределены по значимости. Представлены ключевые авторы и данные, которые позволяют определить направление развития в области исследования.
Ключевые слова: *квадрокоптер, беспилотный летательный аппарат, строевая задача.*

A. S. Kostin*
Assistant
P. O. Zavyalov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF PUBLICATION ACTIVITY IN THE FIELD OF GROUP MANAGEMENT OF QUADROCOPTERS BASED ON THE RUSSIAN SCIENTIFIC CITATION INDEX AND THE SCOPUS DATABASE

The article presents an analysis of publication activity in the field of group management of quadrocopters based on the Scopus database and the Russian Science Citation Index (RSCI) from 2017 to 2021. The research of publications was carried out using the programs VOSviewer and BIBLIOMETRIC. With the help of the information system, the publications were distributed by importance. The key authors and data that allow determining the direction of development in the field of research are presented.
Keywords: *quadcopter, unmanned aerial vehicle, combat task.*

Введение

Данная область является актуальной в применении, так как на практике далеко не все задачи можно решить, используя лишь одну беспилотную авиационную систему. Существует несколько подходов к классификации автономности БАС. Одним из лучших способов понять автономность беспилотных летательных аппаратов является spectrum, разработанный Drone Industry Insights. Если автономность является мерой независимости от внешнего влияния и уровня самоуправления, то разные платформы могут быть автономными, но в разной степени спектра автономности. Ключевым моментом является понимание этих различных уровней и того, как они выглядят на практике в отрасли без персонала. Рассмотрим уровни автономности.

Уровень 0: никакой автоматизации. Оператор полностью контролирует каждое движение дрона. Практическое применение: беспилотные авиационной системы для гонок и модельные самолетов.

Уровень 1: низкая автоматизация. Пилот по-прежнему контролирует общую работу и безопасность беспилотной авиационной системы (далее – БАС).

Уровень 2: частичная автоматизация. Пилот по-прежнему несет ответственность за безопасную эксплуатацию БАС и должен быть готов взять управление БАС на себя, если что-то случится. Однако при определенных условиях дрон

может взять на себя управление курсом, высотой и скоростью. В настоящее время большинство производителей создают дроны такого уровня.

Уровень 3: условная автоматизация. Как и на втором уровне, дрон может летать сам по себе, но оператор все равно должен быть внимателен и готов взять управление на себя в любой момент. Дрон уведомляет оператора о необходимости вмешательства.

Уровень 4: высокая автоматизация. Беспилотной авиационной системой может управлять оператор, но это не всегда требуется. Ожидается, что БАС будет иметь резервные системы. Его поведение зависит от фиксированной встроенной функциональности или от фиксированного набора правил, которые диктуют поведение системы.

Уровень 5: полная автоматизация. Дрон управляет собой при любых обстоятельствах, не дожидаясь вмешательства человека. Это включает в себя полную автоматизацию всех полетных задач в любых условиях. Примеров таких беспилотных авиационных систем пока нет, и в настоящее время они не производятся. Однако ожидается, что они смогут использовать инструменты искусственного интеллекта для планирования своих полетов.

Начиная со второго уровня автоматизации, можно использовать дроны для групповых полетов. Групповой полет – это полет с участием нескольких беспилотных авиационных систем, которые действуют как единый дрон в отношении навигации и уведомлений о местоположении, а также получения разрешений от органов управления воздушным движением. Стандартная группа БАС выполняет общую задачу, при которой каждый элемент группы находится на расстоянии не более 1,85 км по горизонтали и 30 м по вертикали от ведущего. Нестандартная группа – это группа, которая вылетает за пределы стандартной группы. Групповой полет дронов может выполняться как на открытом воздухе, так и в помещении. Кроме того, мы рассматриваем классификацию уровней группового полета в соответствии с приведенной выше классификацией автономности БАС.

Уровень 0 – контролируемый полет каждого подразделения. Каждый дрон управляется отдельным пилотом, но существует совместная миссия и местоположение. Примерами таких групп являются гонки и шоу дронов.

Уровень 1 – синхронный полет. Все дроны в группе выполняют одну и ту же задачу. Оператором может быть один человек. Для небольшой группы БАС разрабатывается специальная управляющая программа или скрипт, который будет одновременно посылать необходимые для выполнения команды всем БАС в группе. Современные методы использования: организация выставок и презентаций в помещении.

Уровень 2 – условный асинхронный полет. Каждый дрон в группе выполняет свою собственную функцию, т. е. летит по своей собственной траектории. Практическое применение: для небольшой группы БАС разрабатывается специальная управляющая программа или сценарий, которая передает информацию об отдельных заранее запрограммированных траекториях в зависимости от дрона. Оператор не может вмешиваться во время полета. Современные методы использования – шоу в помещении.

Уровень 3 – организованный автоматизированный полет. Это квинтэссенция первых двух уровней, но количество БАС в группе намного выше, чем в предыдущих случаях. Практическое использование: полет готовится в уже существующем специальном программном обеспечении, которое организует полет группы дронов по заданным траекториям. Существует моделирование и автоматическое управление расстоянием между беспилотниками в группе в каждый момент полета. Оператор может быть один, но программное обеспечение имеет возможность вмешиваться в миссию любого беспилотника в любое время во время полета. Современные методы использования: выставки на открытом воздухе, мониторинг территории.

Уровень 4 – полет формирования роя. Подход к групповому полету БАС, который черпает вдохновение в самоорганизующемся поведении. Оператор определяет правила поведения конкретного дрона, но уже на этапе планирования и моделирования полета. При выполнении полетного задания каждый беспилотник обладает полной автономностью. Оператор может только принять решение о прекращении группового полета.

С учетом описанных уровней автоматизации выполнения как одиночных автономных полетов, так и групповых полетов, которые выполняют различные полетные задания. По тематике группового полета ведутся различные исследования.

Авторами статей использовано 259 ключевых слов, из них наиболее часто встречаются такие как: antennas – 62 раз, количество ссылок – 352, unmanned aerial vehicles (uav) – 55 раза, ссылок – 287, orbits – 57 раза, ссылок – 270, наименее часто встречается слово – levy flight (рис. 2 и 3).

В данной наукометрической картине наибольшее количество статей у авторов Zhang. X. – по 13 статей, на них ссылаются по 7 раз, далее сле-

дует автор Wang Y., у которого по 12 статьи и 10 ссылок, у автора Li J. – 11 статьи и по 11 ссылок далее следуют авторы, у которых по 10 статей и менее [3].

Наукометрический анализа BIBLIOMETRIX

Этап 1. Основная информация о файле табл. 1.

Для выполнения задания, нужно создать новый проект на сайте https://login.rstudio.cloud/, где с помощью пакета Biblioshiny для Bibliometrix можно провести анализ данных [1].

Основные данные о выборке содержат такие сведения, как например среднее цитирование, в данном случае оно равно 7,048. Из таблицы видно, что тематика теряет популярность, и темпы публикаций снижаются. Это видно по среднему «возрасту» статей в 2.92 года.

Этап 2. Ежегодная научная продукция. На этом этапе можно проследить изменение роста количества статей по теме исследования. В 2017 г. – 391, в 2018 г. – 409, в 2019 г. – 380, в 2020 г. – 395, в 2021 г. – 358, количество статей выросло с 2017 по 2021 г. постоянно колеблется на среднем уровне, но в последнее время идет на снижение (рис. 1). Ежегодный рост публикаций по графику в выборке –27.08%.

Этап 3. Среднее количество цитирований статей в год. На данном этапе определяется среднее количество цитирований статей в год. Пик приходится на 2017 год и с тех пор цитирование постепенно снижается (рис. 2). Графики цитируемости показывают среднюю цитируемость на уровне 1,5–2,5 цитирований в год за публикацию. Тема медленно теряет популярность, так как наблюдается падение после 2018 года, затем плавный подъем до 2019 и резкое падение в 2021 году.

Этап 4. Определение Индекса Хирша. Для исследуемого файла Индекс Хирша у авторов достаточно высок: наивысший – 8, средний – 5. Это может свидетельствовать о том, что тема активно изучается учеными (рис. 3).

Таблица 1

Основные данные о выборке

Description	Results
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
Timespan	2017:2022
Sources (Journals, Books, etc)	960
Documents	2000
Annual Growth Rate %	-27.08
Document Average Age	2.92
Average citations per doc	7.048
References	73078
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	9625
Author's Keywords (DE)	4721
AUTHORS	
Authors	5994
Authors of single-authored docs	139
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored docs	154
Co-Authors per Doc	4.13
International co-authorships %	19.1
DOCUMENT TYPES	
article	1146
book	3
book chapter	44
conference paper	656
conference review	2
data paper	1
editorial	8
erratum	1
letter	4
note	8
review	117
short survey	10

Публикационная активность в РИНЦ

Информационной платформой, в которой представлены публикации, является РИНЦ (Российский индекс научного цитирования). РИНЦ – это российская библиографическая база данных научного цитирования, содержащая более 12 млн публикаций российских авторов, а также информацию о цитировании этих публикаций из более 6000 российских журналов. Она предназначена не только для оперативного обеспечения научных исследований актуальной справочно-библиографической информацией, но является также мощным аналитическим инструментом, позволяющим осуществлять оценку результативности и эффективности деятельности научно-исследовательских организаций, ученых, уровень научных журналов и т. д.

Пик публикаций по группам квадрокоптеров в РИНЦ пришелся на 2021 год, данные за 2022 год еще опубликованы не полностью. Интерес к теме растет ежегодно [2].

Ранжирование публикаций по значимости в рейтингах

Ранжирование публикаций по значимости в рейтингах. Квартиль (Q) – категория научных журналов, определяемая библиометрическими показателями, отражающими уровень цитируемости, т. е. востребованности журнала научным

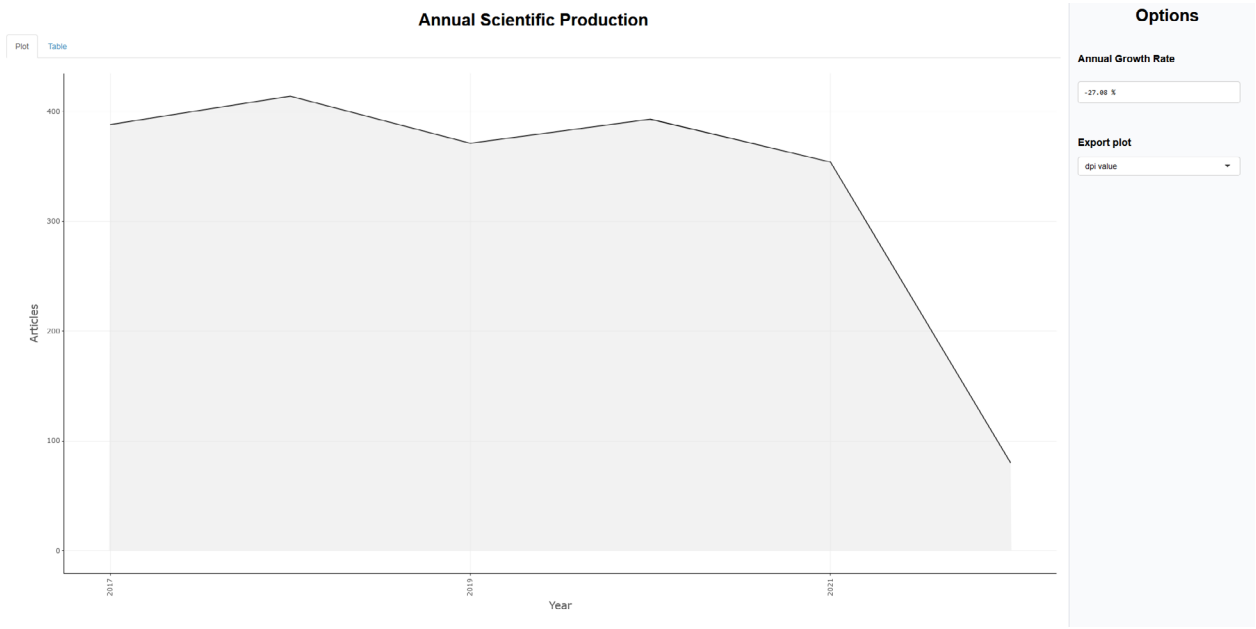


Рис. 1. Ежегодная научная продукция

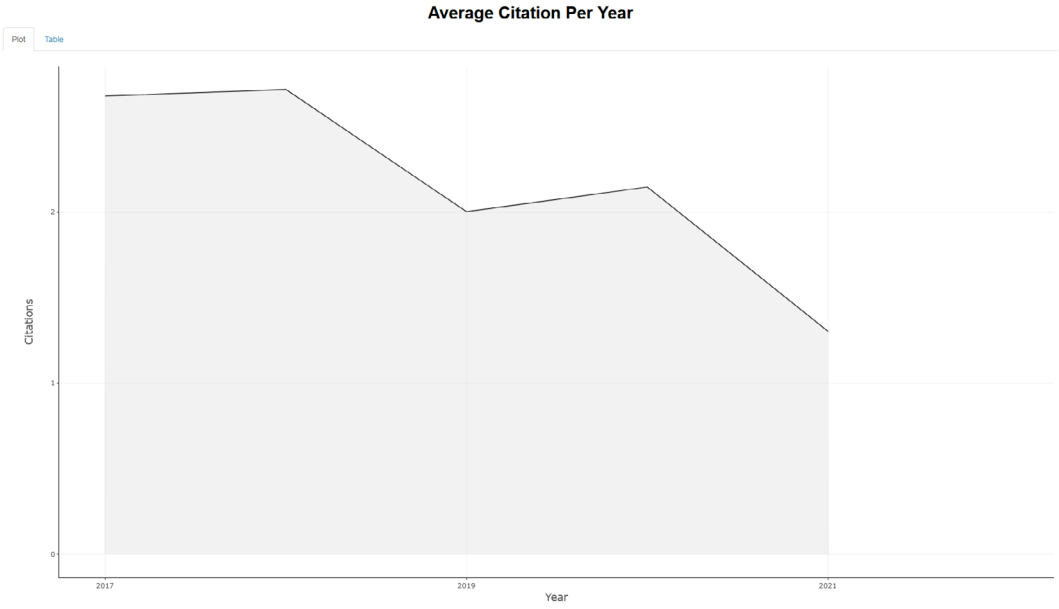


Рис. 2. Среднее количество цитирований статей в год

сообществом. Всего их 4 – Q1, Q2, Q3 и Q4. При этом Q1 – самый высокий квартиль, Q4 – самый низкий. В Scopus квартилями обладают журналы, которые индексируются в нем 3 года и более.

Квартиль Q1:
1. PLoS ONE.
2. Scientific Reports.
3. Acta Astronautica.
4. IEEE Robotics and Automation Letters.

Квартиль Q2:
1. Lecture Notes in Computer Science.
2. Journal of Separation Science.
3. Frontiers in Human Neuroscience.

Квартиль Q3:
1. Aerospace medicine and human performance.
2. IFAC-PapersOnLine.

Element	h_index	g_index	m_index	TC	NP	PY_start
WIENER JM	8	11	1.333	300	11	2017
JACOBS J	7	8	1.400	198	8	2018
LACZÓ J	7	11	1.167	233	11	2017
SPIERS HJ	7	9	1.167	477	9	2017
AHMETOVIC D	6	8	1.000	147	8	2017
ASAKAWA C	6	8	1.000	147	8	2017
BRANDT T	6	9	1.000	156	9	2017
DACKE M	6	6	1.200	99	6	2018
EKSTROM AD	6	10	1.000	236	10	2017
EL JUNDI B	6	8	1.200	87	8	2018
HORT J	6	10	1.000	228	10	2017
LI Y	6	10	1.000	112	13	2017
MOFFAT SD	6	6	1.000	215	6	2017
WANG Y	6	11	1.000	133	20	2017
BOCCIA M	5	9	0.833	84	9	2017
CLAESSEN MHG	5	8	0.833	65	8	2017
DIETERICH M	5	7	0.833	135	7	2017
DOELLER CF	5	6	1.000	271	6	2018
GRAHAM P	5	8	0.833	82	8	2017
GUARIGLIA C	5	9	0.833	85	10	2017
GUERREIRO J	5	6	0.833	116	6	2017
HE X	5	10	0.833	113	15	2017
HORNBERGER M	5	9	1.000	264	9	2018
LIU H	5	10	0.833	125	10	2017
LIU J	5	8	0.833	86	17	2017
LIU Y	5	7	0.833	70	22	2017
MOURITSEN H	5	5	1.000	215	5	2018
NEWCOMBE NS	5	9	0.833	83	9	2017
PICCARDI L	5	7	0.833	57	8	2017
SCHÖBERL F	5	6	1.000	41	6	2018
VAN DER HAM IJM	5	8	0.833	65	10	2017
YE W	5	8	0.833	77	8	2017

Рис. 3. Определение Индекса Хирша

Рис. 4. Распределение публикаций по годам в РИНЦ по области «Группа квадрокоптеров»

Квартиль Q4:

1. Advances in Intelligent Systems and Computing.

2. Lecture Notes in Electrical Engineering.

Было произведено разграничение публикаций по значимости в рейтингах с помощью информационной системы SCImago Journal Rank [4]. Наиболее высокими квартилями Q1 обладают журналы: PLoS ONE, Scientific Reports, Acta Astronautica, IEEE Robotics and Automation Letters.

Таблица 2

Квартиль Q1. Журнал «Plos One»

Type	SJR	H index	Total Docs. (2021)	Total Docs. (3years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3years)	Citable Docs. (3years)	Cites/Doc. (2years)	Ref./Doc. (2021)
journal	0,852	367	16626	49727	799694	188716	49720	3,58	48,10

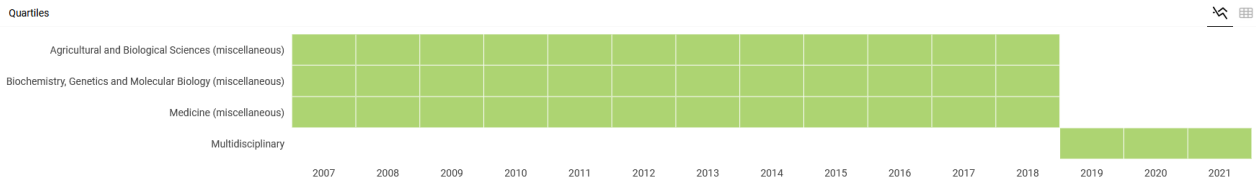


Рис. 5. Информация о журнале «PLoS ONE»

Таблица 3

Квартиль Q2. Книжное издание «Lecture Notes in Computer Science»

Type	SJR	H index	Total Docs. (2021)	Total Docs. (3years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3years)	Citable Docs. (3years)	Cites / Doc. (2years)	Ref. / Doc. (2021)
book series	0,407	415	19219	66817	467112	72539	62097	0,97	24,30

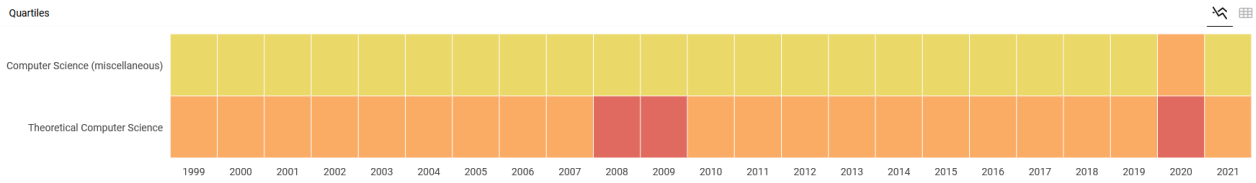


Рис. 6. Информация о журнале « Lecture Notes in Computer Science»

Таблица 4

Квартиль Q3. Журнал «Aerospace Medicine and Human Performance»

Type	SJR	H index	Total Docs. (2021)	Total Docs. (3years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3years)	Citable Docs. (3years)	Cites / Doc. (2years)	Ref. / Doc. (2021)
journal	0,265	73	186	531	2910	385	462	0,65	15,65

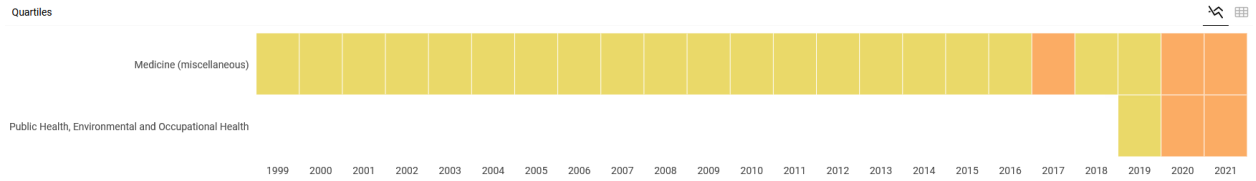


Рис. 7. Информация о журнале «Aerospace Medicine and Human Performance»

Таблица 5

Квартиль Q4. Книжная серия «Advances in Intelligent Systems and Computing»

Type	SJR	H index	Total Docs. (2021)	Total Docs. (3years)	Total Refs. (2021)	Total Cites (3years)	Citable Docs. (3years)	Cites / Doc. (2years)	Ref. / Doc. (2021)
book series	0,215	48	9502	36550	161571	22047	34007	0,61	17,00

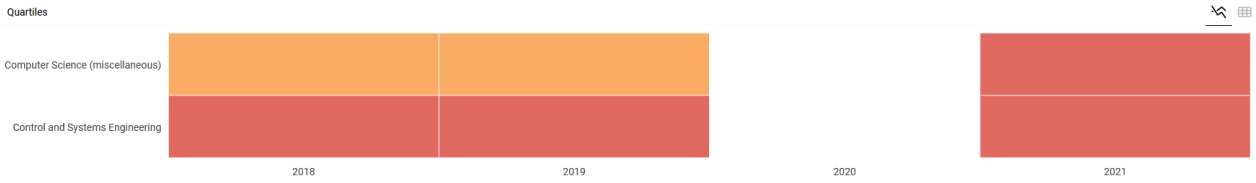


Рис. 8. Информация о журнале «Advances in Intelligent Systems and Computing»

Самым низким квартилем Q4 обладает журналы: Advances In Intelligent Systems and Computing, Lecture Notes in Electrical Engineering [6].

Заключение

В ходе исследования наукометрии в программе Bibliometrix было выявлено, что выбранная область исследования уже прошла свой пик в 2019 году и публикационная активность по ней снижается. Наиболее цитируемые работы были опубликованы в 2017-2018 годах, а средний возраст статей достигает 2,84 лет. Также было выяснено, что многие авторы не углубляются в тематику, публикуя одну-две статьи, и пишут свои публикации в соавторстве.

Как показало подробное исследование статей из подборок РИНЦ, тематика использования групп квадрокоптеров получила большое развитие в России и этой темой занимаются преимущественно российские авторы. В Scopus групповое управление больше используют при изучении микрочастиц и биологии, в медицине, в машиностроении. Таким образом, из огромной выборки статей по Scopus лишь немногие обозревают именно групповой полет БПЛА, а скорее углубляются на использовании БПЛА в сторонних исследованиях.

Библиографический список

1. RStudio Cloud. URL: https://login.rstudio.cloud/ (дата обращения: 30.11.2022).

2. Российский индекс научного цитирования: научная электронная библиотека. URL: https://www.elibrary.ru/project_risc.asp? (дата обращения: 30.11.2022).

3. VOSviewer Preview. URL: https://www.vosviewer.com/ (дата обращения: 30.11.2022).

4. *Костин А. С., Румянцев М. Е.* Модели и методы автономной навигации и посадки на движущуюся платформу беспилотной авиационной системы мультироторного типа // Системный анализ и логистика. Вып. № 2 (32), СПб.: ГУАП., 2022. С. 66–72. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-2-66-72. ISSN 2077-5687

5. *Костин А. С.* Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения // Системный анализ и логистика. Вып. № 1 (19). СПб.: ГУАП. 2019. С. 70–80. ISSN 2007-5687.

6. Scimago Journal & Country Rank. URL: https://www.scimagojr.com/ (дата обращения: 30.11.2022).

УДК 681.5:519.2, 658.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-211-219**

А. С. Костин*
ассистент
Н. Н. Майоров*
доктор технических наук, доцент
М. Р. Язвенко*
инженер
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОСТАВКИ ГРУЗОВ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ В ГРАНИЦАХ РАЙОНА ГОРОДА

Задачи доставки грузов беспилотными авиационными системами сегодня актуальны, востребованы и являются новыми точками развития в транспортной сфере и цепях поставок. Сегодня, в условиях плотной городской застройки и увеличения числа автомобилей на дорогах, доставка мелких посылок беспилотниками выглядит все более и более привлекательной. Внедрение беспилотной авиационной системы в классическую наземную доставку грузов вызывает необходимость решения группы новых междисциплинарных вопросов. Перед проведением реальных полетных экспериментов необходимо проводить детальную теоретическую проработку, в том числе и оценку выбора задачи маршрутизации. В работе приведено решение задачи выбора маршрутов для беспилотной авиационной системы на основе моделирования. В предлагаемой авторами модели рассматривается ограничение в виде емкости аккумулятора и определения допустимых полетных расстояний. Представляются варианты доставки, выполненные в имитационной среде AnyLogic для конкретного участка города, и программный код автономного полета квадрокоптера по выбранному маршруту в программе Gazebo и на языке программирования Python. На основе полученных данных по вариантам полета в имитационной среде представляются результаты оптимизационного эксперимента. Результаты исследования, на основе исследования различных сценариев, позволяют сформировать принятие решений по наилучшей маршрутизации доставки грузов на основе беспилотных авиационных систем. В статье приводятся результаты полетов на основе использования квадрокоптеров в исследовательском летном поле ГУАП.
Ключевые слова: *доставка грузов, anylogic, беспилотная авиационная система, построение маршрута доставки.*

A. S. Kostin*
Assistent
N. N. Maiorov*
Dr. Sc., Tech., Professor
M. R. Yazvenko*
Engineer
** St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODELING THE PROCESS OF CARGO DELIVERY BY UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM WITHIN THE BOUNDARIES OF A CITY AREA

The task of cargo delivery by unmanned aerial systems today is relevant, in demand, and is a new development point in the transportation and supply chain. Today, with dense urban development and the increasing number of cars on the roads, the delivery of small parcels by drones is looking more and more attractive. The introduction of an unmanned aerial system into classic ground-based freight delivery raises a group of new interdisciplinary issues to be addressed. Before real flight experiments, it is necessary to conduct a detailed theoretical study, including evaluation of the routing problem selection. This paper presents a solution to the problem of routing selection for an unmanned aircraft system based on simulation. The model proposed by the authors considers the limitation in the form of battery capacity and the definition of allowable flight distances. Delivery variants performed in the simulation environment AnyLogic for a particular area of the city, and the program code of the autonomous flight of the quadcopter along the selected route in the program Gazebo and in the Python programming language are presented. Based on the obtained data on the flight option in the simulation environment, the results of the optimization experiment are presented. The results of the study, based on the study of different scenarios, allow to form the decision-making on the best routing of cargo delivery based on unmanned aerial systems. The article presents the results of flights based on the use of quadcopters in the SUAI research flying field.
Keywords: *delivery of goods, anylogic, unmanned aerial system, construction of a delivery route.*

Введение

В первую очередь необходимо рассмотреть особенности доставки грузов квадрокоптером (беспилотной авиационной системой). Сегодня мы видим успешные пилотные проекты в данной области, которые позволяют построить системный решения. На основе исследований и успешных проектов видно, что внедрение беспилотных авиационных систем позволяет найти новые решения для автоматизации определенных технологических процессов, позволяет внести организационные изменения в процессы и уменьшить затраты на некоторые рутинные операции. Сегодня особенной актуальность пользуются решения на основе беспилотных систем по доставке грузов, решения для цепей поставок. Беспилотные летательные аппараты, или дроны, способны значительно снизить стоимость и время доставки грузов на последнюю милю в городах. Несмотря на этот потенциал, требуется отдельные разработки задач маршрутизации специально для сценариев доставки грузов беспилотниками (дронами). Существующие системы планирования наземных маршрутов недостаточны для организации беспилотных доставок: либо не допускается выполнение многократных поездок (полетов), к примеру, на склад, или точке старта, что приводит к решениям с избытком дронов, либо не учитывается влияние веса батареи и полезной нагрузки на потребление энергии, что приводит к дорогостоящим или, что чаще всего, невыполнимым маршрутам.

С практической точки зрения, задачи доставки грузов беспилотниками, как альтернатива, сегодня пользуются особым внимаем, так как значительно увеличилась загруженность улично-дорожной сети, что вызывает сбои и задержки в доставке. Доставка с помощью беспилотников может быть быстрее, чем доставка с помощью традиционных транспортных средств, поскольку беспилотники не ограничены установленной инфраструктурой, такой как дороги, и теоретически, сталкиваются с менее сложными сценариями обхода препятствий.

Данный тренд и потребность усиливается положением, что рынок беспилотных авиационных систем постоянно растет. В 2021 году российский рынок дронов составил около 10 млрд рублей, но может вырасти до 737 млрд рублей к 2025 году. Об этом рассказали на форуме AeroNext 2021 (2022) [1]. Многие страны активно проводят эксперименты по внедрению беспилотных авиационных систем в инфраструктуру своих городов. К примеру, компания Zipline доставляет медицинские грузы (кровь и лекарства) в отдаленные деревни Африки с использованием беспилотных авиационных систем [2]. Другим примером можно сказать, что в Цюрихе тестировался проект по доставке малогабаритных грузов с помощью системы «грузовик-дрон» [3], а компания Amazon зарегистрировала патент на систему доставки грузов с помощью беспилотников [4]. Доставка грузов в гражданских целях сейчас рассматривается как одна из основных сфер для применения беспилотных авиационных систем в гражданских целях.

В условиях плотной городской застройки и увеличения числа автомобилей на дорогах, доставка мелких посылок беспилотниками выглядит все более и более привлекательной. Однако есть ряд ограничений, который необходимо учитывать при выполнении полетных заданий. В данной работе представлено исследование вариантов маршрутизации и выбор наилучшего на основе моделирования группы сценариев и приведено исследование ограничения полетов на основе емкости аккумулятора.

Данное исследование проводится в ГУАП на базе лаборатории беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № FSRF-2020-0004 «Научные основы построения архитектур и систем связи бортовых информационно-вычислительных комплексов нового поколения для авиационных, космических систем и беспилотных транспортных средств»).

Модели доставки грузов беспилотными авиационными системами на основе теории графов

В условиях плотной городской застройки и увеличения числа автомобилей на дорогах, доставка мелких посылок беспилотниками выглядит все более и более привлекательной. Для построения транспортных сетей и исследования маршрутов необходимо использовать модели теории графов [5].

Задача любой доставки состоит в том, чтобы доставить груз из точки А в точку В (рис. 1).

Однако, при доставке в реальных условиях наземным транспортом, граф передвижений расширяется и начинает включать различные узлы улично-дорожной сети. Как правило, вершинами графа будут являться перекрестки и пересечения каких-то дорог, а ребрами – дороги (рис. 2).

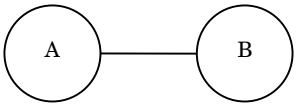


Рис. 1. Граф доставки в общем виде

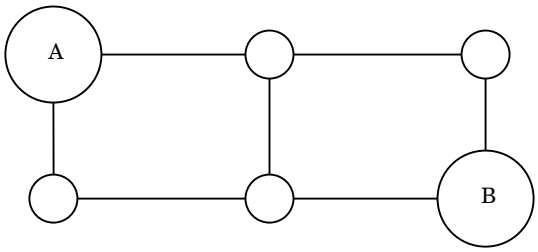


Рис. 2. Граф наземных маршрутов доставки

Оптимальным путем доставки не всегда будет являться самый короткий путь, из-за различных нагрузок дорог и других ограничительных факторов: ремонтов, ограничений скорости, длительности фаз светофоров и т. д.

В некоторых случаях может оказаться так, что хоть пункты А и В находятся физически на близком расстоянии, но оказываются разделены какой-либо преградой и не имеют прямого соединения дорогой, что требует объезда через доступные дорожные сети (рис. 3).

При доставке грузов с помощью дрона можно исключить от необходимости планирования маршрута через улично-дорожную сеть, поскольку дрон может достигать места доставки по спрямленному маршруту (рис. 4).

Исследование ограничений на выполнение полетных заданий

Одним из главных ограничений для применения беспилотников в доставке какого-либо груза является заряд аккумулятора.

В квадрокоптерах широкое распространение получили литий-полимерные (LiPo) аккумуляторы. Такой аккумулятор состоит из нескольких последовательно соединенных ячеек,

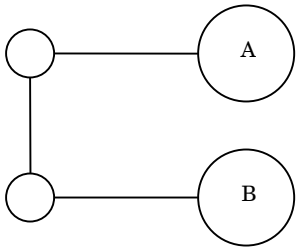


Рис. 3. Граф наземных маршрутов с отсутствием прямой связи между близлежащими пунктами доставки

каждая из которых имеет напряжение около 3,7 В, в зависимости от аккумулятора.

Номинальное напряжение определяется по формуле, согласно источнику [6]:

$$V_{\text{акб}} = V_{\text{ячейки}} \cdot N_{\text{ячеек}}. \quad (1)$$

Для целей моделирования различных режимов были выбраны параметры коптера Клевер 4 компании ООО «Коптер Экспресс Технологии» [7]. На нем применяются 4S аккумуляторы на 3600 мАЧ, которые выдают нормативно 14,8 В. Ожидаемое полетное время можно определить по формуле:

$$t_{\text{полета}} = \frac{\frac{Q}{1000}}{I_{\text{полетной нагрузки}}} \cdot 60, \quad (2)$$

где $t_{\text{полета}}$ – полетное время дрона в минутах; Q – емкость LiPo батареи в мАч; $I_{\text{полетной нагрузки}}$ – ток, отдаваемый аккумуляторной батареей для питания двигателей и другого оборудования с учетом полетной нагрузки.

Ток полетной нагрузки зависит от режима работы дрона, его скорости и веса. Для выполнения исследования примем, что дрон всегда будет на пиковой нагрузке – лететь с максимальной скоростью для заданного груза. В данном случае ток нагрузки будет равен максимальному току. Для квадрокопетра «Clover 4» это 3 Ампер. Максимальная скорость движения не нагруженного дрона составляет 5 м/с. Дрон способен поднять не более 2-х кг полезной на-

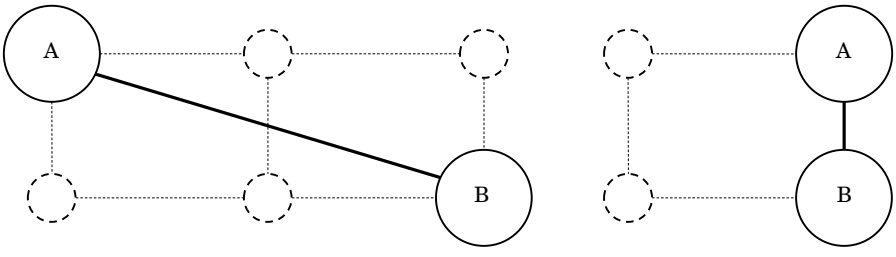


Рис. 4. Сравнение графов движения дрона и автомобиля

грузки. По этим данным выводится теоретическое уравнение зависимости скорости полета от массы груза:

$$V = -2{,}5m + 5. \quad (3)$$

На основании расчетов и практических полетов, можно сделать вывод, чтобы дрон безопасно завершил свой полет, разряд батареи не должен превышать 80%.

Тогда, зная данные ограничения, можно найти такие режимы полета коптера, при которых можно определить следующие вопросы:

– определить максимальный вес груза, который можно доставить заданным маршрутом при имеющихся параметрах аккумулятора;

– найти критическое решение, при котором доставка дроном перестанет быть выгодной перед автомобильным транспортом.

Исходные данные для моделирования полетных заданий

Для поиска данных режимов полета в условиях реальной улично-дорожной сети можно воспользоваться имитационным моделированием. Моделирование будет проводиться в среде имитационного моделирования AnyLogic [8]. При моделировании будут рассмотрены 2 маршрута: маршрут, граф которого описывается рис. 2, и другой, описываемый рис. 3.

Для этого загружается карта в среду моделирования, строится дорожная сеть. Anylogic при движении агентов в модели автоматически считает самый короткий и быстрый маршрут между двумя узлами заданной сети, что снимает необходимость разработки алгоритмов оптимизации маршрута для движения автотранспорта. Скорость автомобильного движения будет выбрана в, приближенных к идеальным, условиях – отсутствие заторов и прочих препятствий.

На рис. 5 и 6 представлены карты моделируемых маршрутов. Зеленым цветом отмечен оптимальный маршрут движения автомобиля, красным – неоптимальный, а синим – путь квадрокоптера по воздуху. Квадрокоптер движется на высоте достаточной, чтобы перелететь все дома, строения и сооружения на маршруте.

Данный случай представляет собой простейшую уличную сеть, в которой начальный и финальный пункты находятся в паре кварталов между собой (рис. 5).

В данном случае, маршрут прослеживается как граф рис. 3, при котором имеется препятствие в виде гаражных кооперативов и железной дороги, а прямого автомобильного маршрута нет. Грузовому автомобилю требуется развернуться на двух развязках и переехать через путепровод.

Результаты моделирования полетных заданий в границах микроуровня города

Для поставленных условий, производятся оптимизационные эксперименты в среде Any-

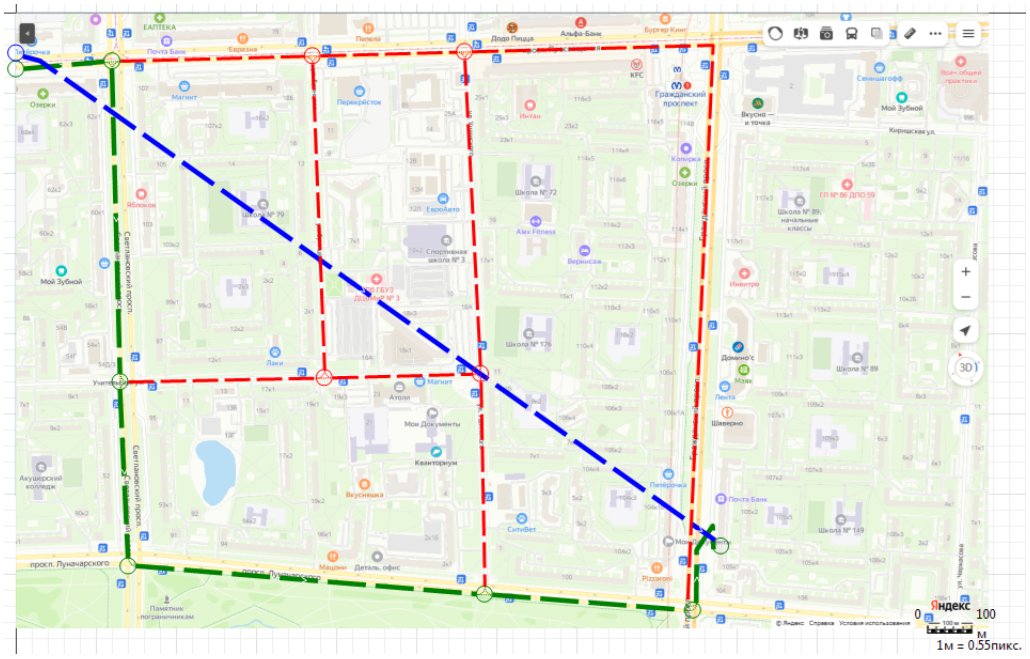


Рис. 5. Вариант полетного задания и маршрута № 1

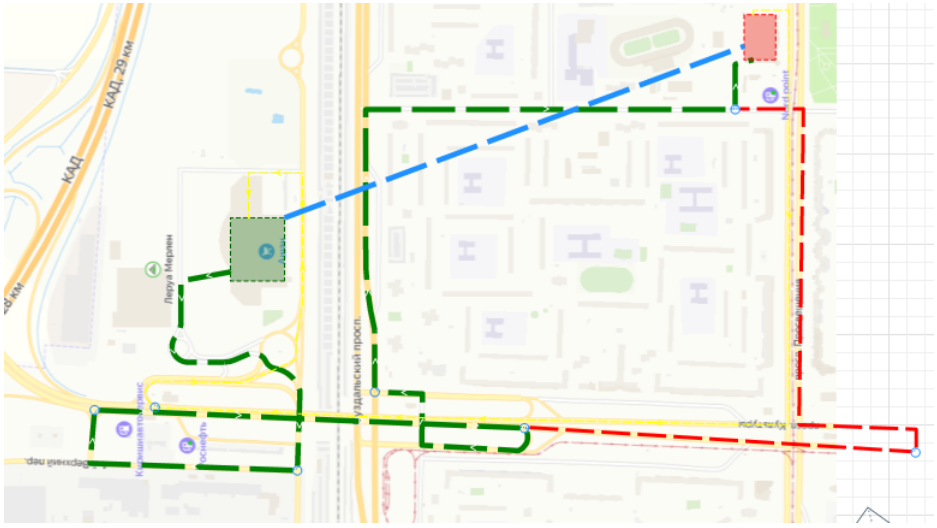


Рис. 6. Вариант полетного задания и маршрута № 2

Logic. Данные эксперименты «прогоняют» модель многократно с различными значениями заданного параметра и находят экстремум целевой функции.

Поиск максимального веса груза производится с учетом ограничения на максимальный разряд батареи в 80%. В ходе эксперимента варьируется вес груза и осуществляется проверка остаточного заряда батареи. Если заряд меньше 20%, то результат считается недопустимым и запускается следующая итерация [9, 10, 11].

Оценка целесообразности применения квадрокоптера, а не грузового автомобиля, осуществляется по времени доставки. Алгоритм подбирает вес груза, при котором разница по времени доставки будет максимально приближена к нулю.

При весе груза в 897 грамм разница во времени доставки дроном и грузовым автотранспортом стремится к нулю. Соответственно, доставка дроном выгоднее доставки грузовым автотранспортом на данном маршруте при весе груза от 0 до 897 грамм. Данный параметр составил 55% от максимально возможного – 1.635 кг.

Далее рассматриваем второй маршрут, на котором имеются препятствия для движения грузового автомобиля.

Максимальный вес в таком случае составляет 1,809 кг. Это уже цифра, приближающаяся к максимальной подъемной массе коптера.

На основе моделирования и проведения оптимизационных экспериментов целесообразный вес груза, когда маршрут грузового автомобиля значительно длиннее спрямленного, составил уже 87% от максимального – 1,566 кг.

Построение автономного полетного задания беспилотной авиационной системой для доставки грузов

Рассмотрим пример реализации автономной доставки груза квадрокоптером в имитационной программной среде Gazebo. В рамках рассмотренного примера построения маршрута доставки груза квадрокоптером разработаем программное обеспечение, которое позволит выполнить следующие действия (на основе анализа работа [8, 9, 10]):

– выполнить автономный взлет квадрокоптера;

– построить кратчайший маршрут движения квадрокоптера в заданные координаты доставки;

– выполнить посадку с выгрузкой доставляемого груза в точке посадки;

– выполнить взлет квадрокоптера с точки доставки с выполнением возврата в стартовую точку и посадкой на ней.

Для расчета счета кратчайшего маршрута используется следующая формула:

$$K_{x,y,z} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}, \quad (4)$$

где X_0, Y_1, Z_0 – начальные координаты квадрокоптера, X_1, Y_1, Z_1 – координаты для доставки грузов

На рис. 11 представлена схема полета квадрокоптера при доставке.

В данном случае красная стрелка представляет собой полет квадрокоптера по оси X, зеленая по оси Y, черная стрелка представляет собой полет по кратчайшему пути. Выполним симуляцию автономного полета квадрокоптера в

Рис. 7. Максимальный вес груза для первого маршрута

Рис. 8. Максимальный вес груза для целесообразности воздушной перевозки на первом маршруте

Рис. 9. Максимальный вес груза для второго маршрута

Рис. 10. Максимальный вес груза для целесообразности воздушной перевозки на втором маршруте

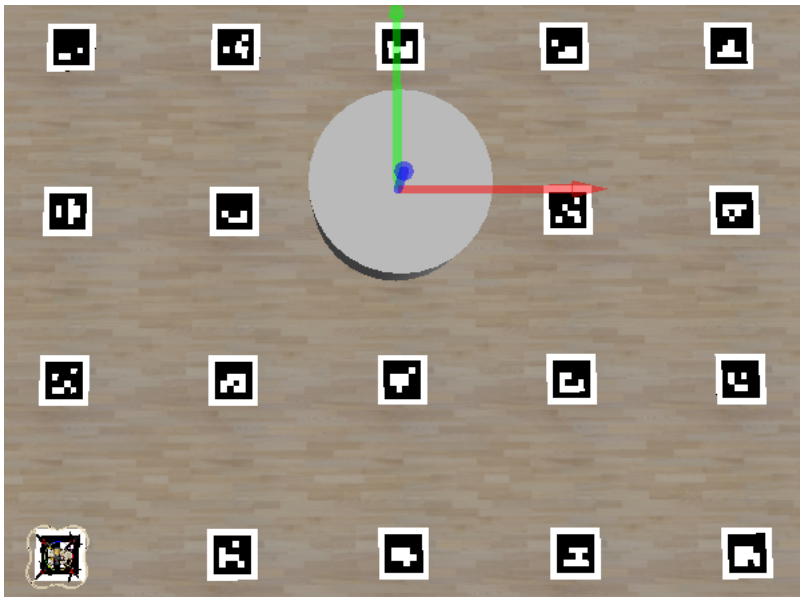


Рис. 11. Схема полета квадрокоптера в симуляционной среде

точку доставки. Исследование полетных режимов квадроптера Clover пердставлено в работах [12, 13, 14].

Приведем фрагмент программного кода для навигации квадрокоптера при выполнении полета:

```
def navigate_wait(x=0, y=0, z=2, yaw=float(math.radians(90)), speed=0.5, frame_id='aruco_map', auto_arm=False, tolerance=0.2):
    navigate(x=x, y=y, z=z, yaw=yaw, speed=speed, frame_id=frame_id, auto_arm=auto_arm)
    while not rospy.is_shutdown():
        telem = get_telemetry(frame_id='navigate_target')
        if math.sqrt(telem.x ** 2 + telem.y ** 2 + telem.z ** 2) < tolerance:
            break
        rospy.sleep(0.2)

# Взлет на высоту 1 м
navigate(x=0, y=0, z=1, frame_id='body', auto_arm=True)

# Ожидание 3 секунды
rospy.sleep(3)

# Пролет в координаты доставки
navigate_wait(x=2, y=2)
```

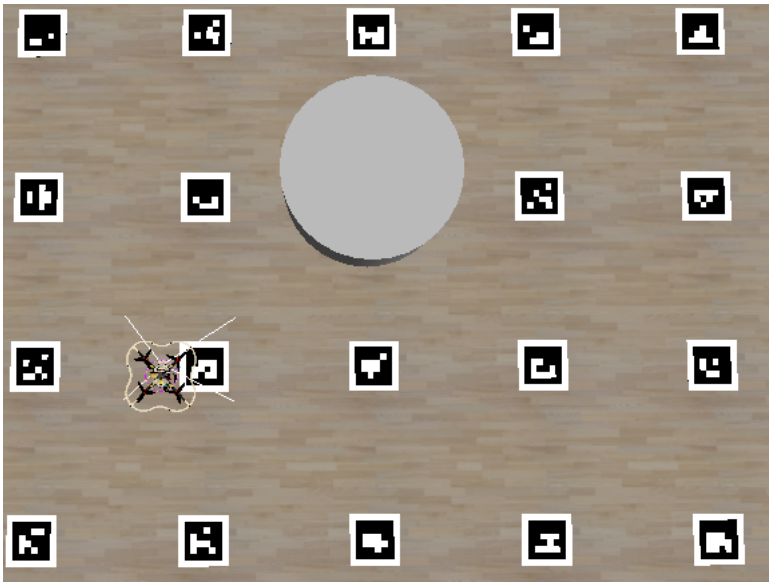


Рис. 12. Процесс полета квадрокоптера в симуляционной среде

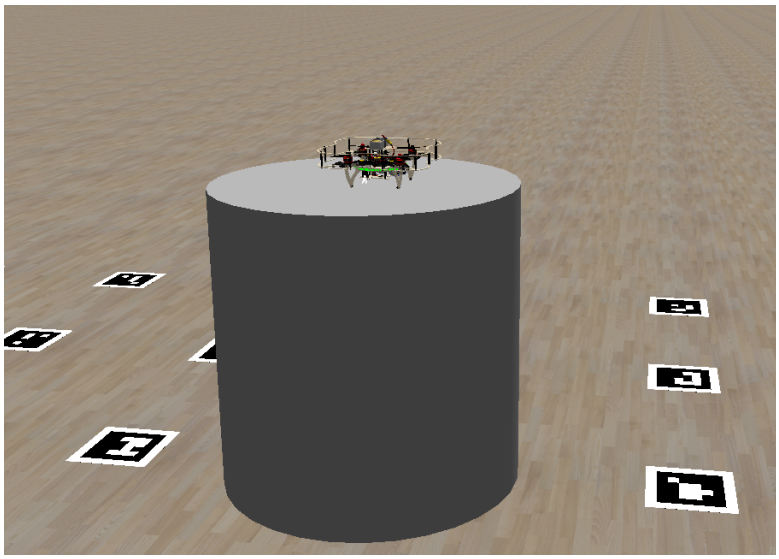


Рис. 13. Приземление квадрокоптера в точке доставки

Заключение

Несмотря на хорошую проработку задачи маршрутизации для наземных транспортных систем, при внедрении беспилотных авиационных систем в контур доставки, возникают новые задачи и ограничения. Выполнение полета дрона по кратчайшем маршруту необходимо исследовать заранее. Наиболее правильным путем исследования является моделирование полетных заданий и проведение оптимизационных экспериментов в имитационных программных средах. Причем именно проведение оптимизационного эксперимента позволяет найти наилучшее решение.

Как показали результаты экспериментов, доставка воздухом выгоднее в тех случаях, когда между пунктами доставки нет прямого дорожного соединения и грузовой автотранспорт вынужден использовать объездные пути. Однако, моделирование проводилось в математически идеальных условиях: нет учета заторов и пробок, долгого ожидания на светофорах и погоды. Таким образом полученные результаты необходимо использовать с включением данных по загруженностям транспортных сетей и состоянию воздушного

пространства. В реальности, при учете дорожной обстановки, доставка грузовым автомобилем может быть медленнее и будет наблюдаться значительное преимущество в скорости доставки беспилотной авиационной системой. На беспилотную авиационную систему не оказывает влияние городская транспортная инфраструктура, но накладываются аппаратные ограничения и ограничения со стороны воздушного пространства. Дополнительно необходимо сказать, что эксплуатация беспилотника и может сократить как время доставки, так и транспортные издержки, законы на сегодняшний день обязывают к согласованию полета заранее в установленном порядке.

Исследуя различные варианты доставки, различные варианты полезной нагрузки, повышается точность и надежность выполнения полетных заданий беспилотными авиационными системами. Решение задачи выбора соответствующих маршрутов позволяет создать проект системы управления (центра управления полетами) группами дронов при выполнении задач доставки грузов.

Библиографический список

1. Аналитики: Российский рынок дронов в 2021 году // Российская газета. URL: https://rg.ru/2021/12/09/analitiki-rossijskij-rynok-dronov-v-2021-godu-sostavliaet-10-mlrd-rublej.html (дата обращения: 10.11.2022).

2. Zipline – Instant Logistics. URL: https://flyzipline.com/global-healthcare/ (дата обращения: 10.11.2022).

3. Mercedes-Benz: Vans & Drones. URL: https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/transporter/vans-drones-in-zurich/ (дата обращения: 10.11.2022).

4. Amazon Receives Patent for Drone Delivery System. URL: https://learningenglish.voanews.com/a/amazon-receives-patent-for-drone-delivery-system/2776033.html (дата обращения: 10.11.2022).

5. *Прокушев Л. А.* Дискретная математика. Основы теории графов и алгоритмизации задач. СПб.: ГУАП, 2000. 81 с.

6. Калькулятор литий-полимерных аккумуляторов для дронов. URL: https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/multicopter-lipo-battery/ (дата обращения: 10.11.2022).

7. COEX Клевер 4 Code – конструктор программируемого квадрокоптера. URL: https://ru.coex.tech/clover (дата обращения: 10.11.2022).

8. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. URL: https://www.anylogic.ru/ (дата обращения: 10.11.2022).

9. *Suzuki S., Abe K.* Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Comput. Vis. Graph. Image Process. 1985. 30 (1). P. 32–46.

10. *Markus H., Raffaello D'Andrea.* Quadro copter trajectory generation and control // IFACworldcongress. 2011. Vol. 18. No. 1. P. 1485–1491.

11. *Sezgin M., Sankur B.* Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // Electron Imaging. 2004. 13 (1). P. 146–165.

12. *Карпова Т. Ю., Костин А. С., Майоров Н. Н.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем: учеб. пособие / Под ред. Н. Н. Майорова. СПб.: ГУАП, 2021. 167 с.

13. *Еленин Д. В., Костин А. С., Майоров Н. Н.* Основы автономного управления беспилотными авиационными системами для решения транспортных задач. СПб.: ГУАП, 2020. 71 с.

14. *Богатов Н. В., Костин А. С.* Управление и анализ полета квадрокоптера при задании сложной траектории движения // Системный анализ и логистика. 2020. № 4 (26). С. 3–12.

УДК 656.073.28:519.711.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-220-224**

Т. Е. Маликова*
доктор технических наук, доцент
Е. Е. Соловьева**
старший преподаватель
А. Ж. Радочинская*
аспирант
**Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток*
***Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток*

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПОГРУЗЧИКА НА МЕХАНИЗИРОВАННОМ КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ

Приведены результаты математического моделирования системы управления рабочим циклом погрузчика с использованием автоматного программирования. Автоматное программирование – стиль программирования, в котором поведение выполняемой программы описывается автоматом, который в дальнейшем преобразуется в код. Предметом исследования является структура системы управления процессом выполнения операций формирования и расформирования штабеля в зоне хранения контейнерного терминала. Предложена диаграмма переходов детерминированного конечного автомата, позволяющая четко представить логику управления действиями погрузчика при выемке контейнера из штабеля, а также формировать в процессе выполнения работ последовательность сигналов управления для погрузчика в виде кодированной строки, в которой каждый символ кода соответствует некоторой операции из его рабочего цикла. Посредством последовательности кодированных символов реализована функция управления технологическими операциями погрузчика.
Ключевые слова: *логистика, складское хозяйство, автоматизация терминалов, транспортно-складские работы, математическое моделирование.*

T. E. Malikova*
Dr. Sc., Tech., Professor
E. E. Soloveva**
Senior Lecturer
A. Zh. Radochinskaia*
PhD Student
**Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi, Vladivostok*
***Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok*

LOADER WORK CYCLE AUTOMATIONAT THE MECHANIZED CONTAINER TERMINAL

The results of mathematical modeling of the loader operation cycle control system using automata-based programming are presented. Automata-based programming is a specific style where the program performance is described by an automaton which is then converted into code. The subject of the study is the structure of the control system for the process of performing the operations of assembling and disassembling a stack in the container terminal storage area. A transition diagram of a deterministic finite automaton is suggested, the diagram makes it possible to clearly represent the logic of controlling the loader operations when removing the container from the stack, as well as to form a sequence of control signals for the loader in the form of an encoded string where each character of the code corresponds to some operation from its working cycle. The controlling function of the loader technological operations is implemented by means of coded characters sequence.
Keywords: *logistics, warehousing, terminal automation, transport and storage operations, transportation-warehousing operations, mathematical modeling.*

Высокая оплата труда ИТ специалистов, по сравнению с зарплатой стивидоров и докеров-механизаторов, характерная для Российской Федерации, значительно снижает выигрыш от внедрения на контейнерном терминале роботизированных и дистанционно-управляемых погрузочно-разгрузочных систем [1]. По этой причине в нашей стане процесс автоматизации механизированных контейнерных терминалов связан с разработкой компьютеризированных (человеко-

машинных) систем управления с тремя иерархическими уровнями, на которых решаются различные по своей сложности задачи [2].

Первый уровень – это автоматизация технологических операций отдельных машин и механизмов складских комплексов [3, 4]. Второй уровень – автоматизация группы технологических операций, выполняемых несколькими машинами (механизмами), связанными между собой единым рабочем циклом [5]. Третий уровень – комплексная автоматизации всех технологических процессов складского комплекса на основе внедрения автоматизированных систем управления [6]. Все три уровня автоматизации по своей значимости для эффективной работы системы грузопереработки на терминале равноценны и рассматриваются в логической последовательности.

В докладе предложен один из вариантов решения задачи автоматизации технологических операций на первом иерархическом уровне управления контейнерным терминалом на примере рабочего цикла погрузчика, выполняющего селективную выемку части контейнеров из основного штабеля для определенных целей (погрузка на транспортное средство, выдача контейнеров грузовладельцам, взвешивание и т. п.).

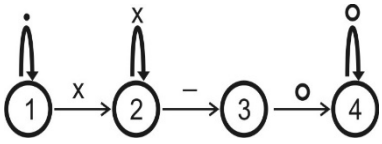
В основание разработки положена идея создания на базе погрузчика технологического автомата (ТА) циклического действия, т. е. рабочей машины, которая самостоятельно выполняет все рабочие и холостые ходы, кроме операций наладки и устранения отказов в работе.

Составными элементами любого ТА являются: входной и выходной накопители, технологическое оборудование, предназначенную для выполнения требуемой технологической операции (или их набора); загрузочно-разгрузочное устройство; устройство управления, обеспечивающее требуемый рабочий цикл автомата. Сопряжение названий составных элементов ТА с элементами складской грузопереработки представлено на рис. 1.

Последовательность выполняемых операций в рамках рабочего цикла погрузчика задается извне в виде управляющей программы, реализованной на основе детерминированного конечного автомата (ДКА) [3]. В данном случае под рабочим циклом будем понимать периодически повторяющиеся через определенный ин-

Таблица 1

Математическая модель ДКА

Диаграмма переходов рабочего цикла ТА	Обозначение операций, выполняемых ТА (стрелки диаграммы переходов)		Элементы множества возможных состояний ТА (вершины диаграммы переходов)	
	•	Переместиться на один ряд вправо	q_1	Перемещение погрузчика вдоль рядов штабеля
	x	Снять верхний контейнер	q_2	Выемка контейнера из яруса штабеля
	–	Вывести целевой контейнер во вспомогательный штабель	q_3	Вывоз целевого контейнера во вспомогательный штабель
	0	Возврат блокирующего контейнера в основной стек	q_4	Возврат блокирующего контейнера в основной стек

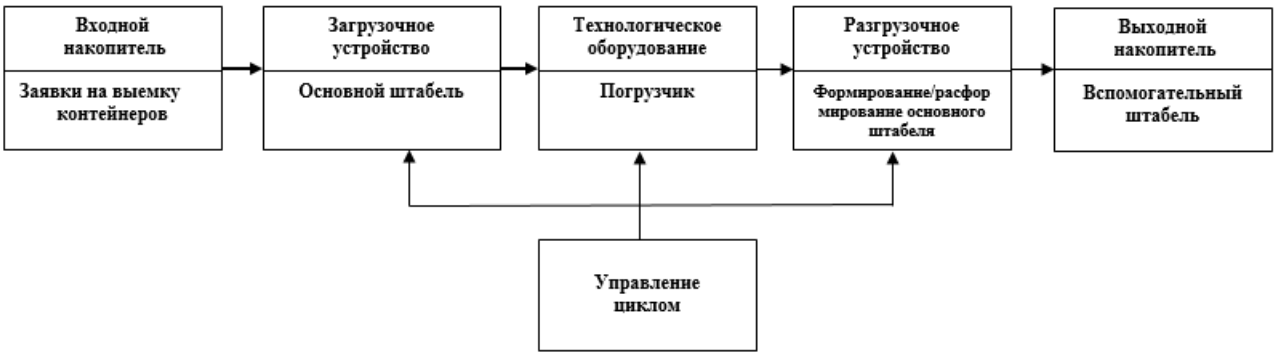


Рис. 1. Состав технологического автомата

тервал времени рабочие и холостые ходы погрузчика при расформировании штабеля в зоне хранения. За каждый рабочий цикл из штабеля вынимается либо один контейнер, либо грузовая партия контейнеров.

Рабочий цикл погрузчика, интерпретированный в виде диаграммы переходов ДКА, представлен в табл. 1. При этом под рабочими ходами погрузчика будем понимать производительные операции, связанные с выемкой из штабеля целевых контейнеров (на которые поступили заявки), а под холостыми – непроизводительные операции, связанные со снятием контейнеров, блокирующих целевой контейнер в стеке, и возврат последних (блокирующих контейнеров) назад в их стек, после вывоза целевого контейнера во вспомогательный штабель.

С внешней технологической средой терминала ТА связан через информационный поток, который содержит информацию о местоположении в штабеле контейнеров, которые необходимо изъять (накопитель заявок), команды и управляющие сигналы для погрузчика, а также информационные сигналы, генерируемые устройством управления и несущие информацию о состоянии ДКА.

Покажем работу ТА на конкретном примере. Пусть в автомат поступила заявка из внешней технологической среды на выемку из основного штабеля двух контейнеров (целевые) и перемещение их во вспомогательный штабель. Один из контейнеров расположен во втором продольном ряду и в третьем ярусе первого поперечного ряда (координаты местоположения в штабеле (2; 3; 1), второй стек), а другой – в четвертом продольном ряду и во втором ярусе первого поперечного ряда (координаты (4; 2; 1), четвертый стек).

Кроме этой информации поступает запрос во внешнюю технологическую среду на определение местоположения ближайшего от второго или четвертого стеков погрузчика по критерию расстояния, т. е. напротив какого продольного ряда штабеля в данный момент времени он находится? Пусть ближайший погрузчик находится возле первого продольного ряда штабеля (ближайший по отношению ко второму стеку). Таким образом задана очередность выемки целевых контейнеров, а именно, первым будет изъят целевой контейнер из второго стека, а вторым – из четвертого.

Как видно из рис. 2, для выемки первого целевого контейнера из штабеля ТА должен выполнить следующий рабочий цикл: переместить погрузчик на один ряд в право, последовательно снять два блокирующих контейнера расположенных над целевым во втором стеке, вынуть из стека целевой контейнер, вывезти целевой контейнер во вспомогательный штабель, вернуть во второй стек основного штабеля в той же последовательности блокирующие контейнера. На этом рабочий цикл ТА по выемки первого целевого контейнера завершен.

Согласно диаграмме переходов ТА (табл. 1) для выполнения последовательности операций этого цикла в системе управления будет сгенерирована строка символов управления (управляющие сигналы для погрузчика) и по системе информационного обмена последовательность этих сигналов передается на пульт управления погрузчиком (табл. 2).

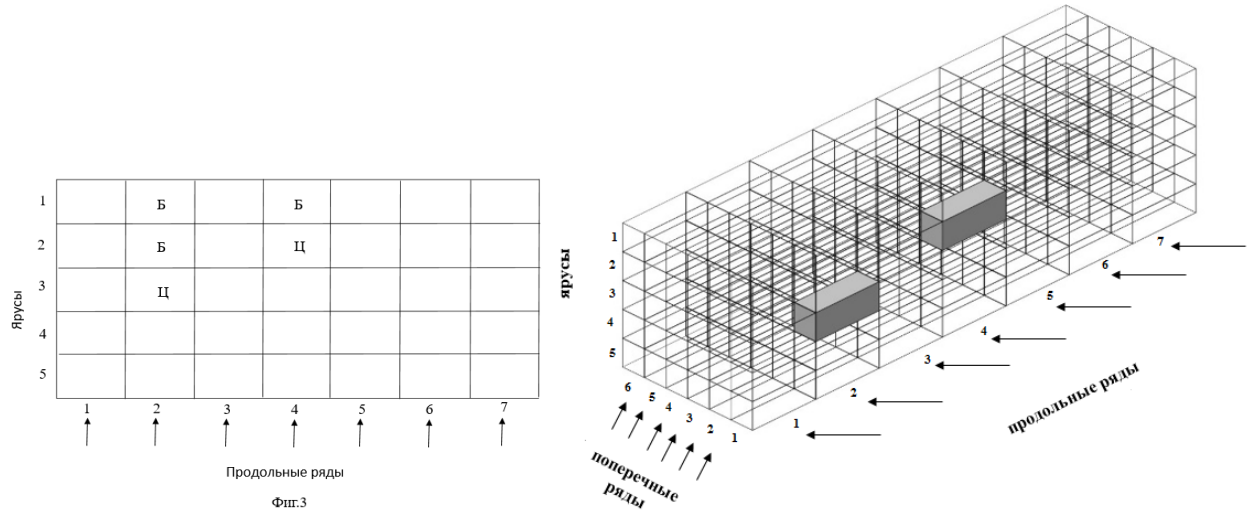


Рис. 2. Местоположение контейнеров в штабеле:
Ц – целевые контейнера; Б – блокирующие контейнера

Таблица 2

Информационный обмен между управляющей системой и погрузчиком при выемке первого целевого контейнера

Строка символов управления						
•	x	x	x	–	0	0
Перемещение погрузчика на один ряд вправо	Выемка двух блокирующий контейнеров во втором стеке		Выемка целевого контейнера из второго стека	Перемещение целевого контейнера во вспомогательный штабель	Возврат блокирующих контейнеров во второй стек	
Раскодировка символов в строке управления						

Таблица 3

Информационный обмен между управляющей системой и погрузчиком при выемке второго целевого контейнера

Строка символов управления					
•	•	x	x	–	0
Перемещение погрузчика на два ряд вправо		Выемка двух блокирующий контейнеров в четвертом стеке	Выемка целевого контейнера из четвертого стека	Перемещение целевого контейнера во вспомогательный штабель	Возврат блокирующего контейнера в четвертый стек
Раскодировка символов в строке управления					

Предыдущий рабочий цикл погрузчик завершил на операции возврата второго блокирующего контейнера во второй стек и остался возле него. Иными словами, текущее местоположение погрузчика возле второго продольного ряда. Для выемки второго целевого контейнера из штабеля (рис. 2) ТА должен выполнить следующий рабочий цикл: переместить погрузчик на два ряда в право, снять один блокирующих контейнера расположенных над целевым в четвертом стеке, вынуть из стека целевой контейнер, вывезти целевой контейнер во вспомогательный штабель, вернуть в четвертый стек основного штабеля блокирующий контейнер. На этом рабочий цикл ТА по выемки второго целевого контейнера завершен.

Согласно диаграмме переходов ТА (табл. 1) для выполнения последовательности операций этого цикла в системе управления будет сгенерирована строка символов управления (управляющие сигналы для погрузчика) и по системе информационного обмена последовательность этих сигналов передается на пульт управления погрузчиком (табл. 3).

Диаграмма переходов ДКА, представленная в табл. 1, и сгенерированные на ее основе строки символов управления программируют процессы, происходящие в блоке управления ТА. При этом диаграмма переходов ДКА интерпретирует логику управления действиями погрузчика при выемке контейнера из штабеля, а каждый символ строки управления соответствует некоторой операции из рабочего цикла погрузчика. Иными словами, посредством диаграммы переходов и последовательности кодированных символов реализована функция автоматизированного управления технологическими операциями погрузчика на механизированном контейнерном терминале.

Библиографический список

1. Сравнительный анализ показателей эффективности автоматизированных и неавтоматизированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, Г. Б. Попов // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1. № 1. С. 76–83. DOI: 10.37220/MIT.2021.51.1.011.

2. Методические аспекты оценки эффективности механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных работ в морских портах / Г. В. Деружинский, В. Е. Деружинский, А. В. Игнатенко, К. А. Аблязов // Эксплуатация морского транспорта. 2022. № 3(104). С. 3–16. DOI: 10.34046/aumsuomt104/1. – EDN SHYZCP.

3. Модель формирования для таможенных целей вспомогательного штабеля контейнеров на языке конечных автоматов / А. Ж. Радочинская, Т. Е. Мали-

кова // Эксплуатация морского транспорта. 2021. № 2 (99). С. 59–66. DOI: 10.34046/aumsuomt99/10. – EDN TVKABH.

4. Provability of dangerous goods segregation algorithm description using finite state-machine description language / A. Z. Radochinskaia, T. E. Malikova, A. Y. Strelkov / 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021 – Conference Proceedings. Saint-Petersburg. 2021. P. 9470722. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470722. – EDN XSPZSH.

5. Разработка системы автоматического управления прецизионной штамповкой на основе математического моделирования / Р. В. Гавариев, К. Н. Гавариева // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 8. С. 20–24.

6. Методика анализа технологического процесса обработки груза на контейнерном терминале / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. 2020. № 2 (95). С. 20–26. DOI: 10.34046/aumsuomt95/3. – EDN OTCLEF.

УДК 656.07 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-225-227**

Ю. Д. Низяева*
аспирант
Н. А. Слободчиков*
кандидат военных наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ ПО ВОПРОСУ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

В статье проведен анализ работ в области повышения эффективности транспортно-экспедиционного обслуживания предприятий и организаций. Выявлены проблемы транспортно-экспедиционного обслуживания на всех этапах логистической деятельности. Выделены перспективные направления исследований в области повышения эффективности транспортно-экспедиционного обслуживания.
Ключевые слова: *транспорт, транспортно-экспедиционные компании, перевозчик, груз, контейнер, рынок логистических услуг.*

Yu. D. Nizyaeva*
PhD Student
N. A. Slobodchikov*
PhD, Military, Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE CURRENT STATE OF SCIENCE ON THE ISSUE OF FREIGHT FORWARDING SERVICES

The article analyzes the work in the field of improving the efficiency of freight forwarding services of enterprises and organizations. The problems of freight forwarding services at all stages of logistics activities have been identified. Promising areas of research in the field of improving the efficiency of freight forwarding services are highlighted.
Keywords: *transport, freight forwarding companies, carrier, cargo, container, logistics services market.*

Транспортно-экспедиционные услуги играют существенную роль в формировании рынка транспортной логистики и являются одним из основных видов экономических услуг, оказываемых в сфере транспорта и сопутствующих сферах экономики. В настоящее время на территории Российской Федерации осуществляют свою деятельность тысячи транспортно-экспедиционных компаний, причем большая часть компаний относится к малому бизнесу. Существуют различные проблемы, связанные с функционированием рынка транспортной логистике, такие как:

1. Одностороннее движение материальных запасов, зачастую транспортное средство сталкивается с трудностью обратной погрузки и обратный рейс может быть выполнен либо порожним, либо поиск нового груза увеличивает транспортные издержки, связанные с простоем.

2. Несогласованность работы различных видов транспорта, из-за чего случаются задержки в доставке и растут расходы, связанные с простоем того или иного вида транспорта.

3. Нерациональное использование объема кузова транспортного средства, связанное с неправильной загрузкой

4. Отсутствие методологии выбора перевозчиков, приводящее к высокому риску утраты, порчи, кражи груза из-за некомпетентности рабочего персонала и неквалифицированных перевозчиков.

Решением данных проблем, в различное время, занимались ученые транспортники, которые достигли определенных успехов, в тоже время предложенные ими решения не позволяют в полном объеме устранить вышеперечисленные проблемы в этой сфере. Для определения направления дальнейших исследований в этой области необходимо проанализировать их работы.

Так, например, в работе Поспеловой Л. Н. «Повышение эффективности транспортно-экс-

педиционных услуг на основе функционирования логистических центров» [1] проводится анализ работы экспедиционных компаний при выполнении контейнерных перевозок. В своей работе автором была предложена математическая модель оптимизации грузовых перевозок с учетом оценки изменения характеристик скоростных контейнерных перевозок при увеличении скорости движения, для этого была использована теория массового обслуживания, предложенная модель сравнивает обычную перевозку с улучшенной (скоростной контейнерной), и было предложено внедрение кондиционных-логистических центров. Однако в работе не учитывается рост стоимости перевозок при внедрении данной системы, а соответственно нельзя полностью утверждать, что данная система будет экономически выгодной и быстро окупаемой в связи с возможным снижением спроса. Также не проработан вопрос рисков порчи и утраты груза при большом количестве промежуточных перегрузочных пунктов на пути следования. Вопросы взаимодействия грузоотправителя и перевозчика были рассмотрены только для железнодорожного транспорта, а начальные и конечные этапы перевозок, которые, как правило, выполняются автотранспортом в работе не рассматривались.

В своей работе «Разработка методов управления транспортно-экспедиционной деятельностью на основе интеллектуальных информационных технологий» Маслов Е. С. [2] предложил метод решения транспортно-экспедиционных задач, таких как оптимальная загрузка транспортного средства, обеспечение бесперебойной работы услуги доставки «от двери до двери», при помощи внедрения виртуальных технологий в организацию и управление. Однако в работе не учитываются факторы, влияющие на транспортные издержки компаний, а именно стоимость создания и внедрения предложенной системы.

В работе Трофимовой Л. С. «Научные основы текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия в условиях неопределенности развития» [3] разработана концепция работы автотранспортного предприятия и классификация видов деятельности, разработаны математические модели, позволяющие спрогнозировать работу подвижного состава, различного по характеристикам, с учетом дальности перевозок. В работе были рассмотрены только вопросы междугородних и международных перевозок, в тоже время не были рассмотрены вопросы автотранспортного предприятия при организации мелких отправок, скоропортящихся, опасных, тяжеловесных, длинномерных, негабаритных грузов.

В работе Прокофьевой О. С. «Методика выбора перевозчика потребителями транспортных услуг» [4] представлена методика выбора оптимального перевозчика, состоящая из многокритериальной оценки вариантов выбора перевозчиков. Данная методика позволяет оценить степень соответствия перевозчика заявленным требованиям, однако она основывается на субъективности решений ответственного лица, соответственно не позволяет выбрать оптимальный вариант решения проблемы.

В работе Тимухина К. М. «Технология оперативного управления коммерческой работой транспортно-экспедиторских предприятий» [5] представлен метод сегментации клиентов транспортно-экспедиторских предприятий с использованием двухмерного ABC-анализа для целей коммерческой политики, методика планирования и определения ключевых показателей эффективности коммерческой работы транспортно-экспедиторских предприятий на основе стратегической карты сбалансированных показателей. Двухмерный анализ не позволяет учитывать всевозможные варианты и не позволяет минимизировать потери при выборе вариантов.

Таким образом, проведенный анализа показал, что вышеперечисленные проблемы изучаются учеными, однако сохраняется необходимость проведения более углубленных исследований, для разрешения противоречия между все возрастающими неопределенностями для участников перевозочного процесса, возникающими у грузоотправителей при поиске наилучшего перевозчика, а также у транспортно-экспедиторских компаний при поисках грузоотправителей, и отсутствием научно-методического аппарата для его разрешения. Кроме того, существует необходимость разработки математической модели и методики выбора перевозчиков, на основе разработки единой системы координирования всех участников логистического процесса и системы мгновенного оповещения этих участников о проблемах, возникающих на всех этапах транспортно-экспедиционного обслуживания.

Библиографический список

1. *Поспелова Л. Н.* Повышение эффективности транспортно-экспедиционных услуг на основе функционирования логистических центров. М.: ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 2018. 182 с.

2. *Маслов Е. С.* Разработка методов управления транспортно-экспедиционной деятельностью на основе интеллектуальных информационных технологий. М.: ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», 2019. 158 с.

3. *Трофимова Л. С.* Научные основы текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия в условиях неопределенности развития. СибАДИ, 2020. 335 с.

4. *Прокофьева О. С.* Методика выбора перевозчика потребителями транспортных услуг // Вестник ИГТУ. 2011. № 4. С. 84–88.

5. *Тимухин К. М.* Технология оперативного управления коммерческой работой транспортно-экспедиторских предприятий. ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2020. 203 с.

УДК 656.025.4 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-228-233**

К. О. Никитина*
магистрант
А. В. Сумманен*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КОПЕНГАГЕН

В статье рассматривается вопрос организации транспортировки теплоизолирующих материалов. Определяются способы перевозки груза, производится подбор специализированного подвижного состава, проводится подробный анализ условий, необходимых для транспортировки теплоизолирующих материалов на железнодорожном, автомобильном и морском транспорте. Как итог, выбирается наиболее оптимальный и предпочтительный вариант транспортировки путем сравнения коммерческих показателей по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *теплоизолирующие материалы, специализированный подвижной состав, организация и технология транспортировки, стоимость и время перевозки.*

K. O. Nikitina*
Postgraduate Student
A. V. Summanen*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SUGGESTIONS FOR THE ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF INSULATING MATERIALS FROM ST. PETERSBURG TO COPENHAGEN

The article deals with the organization of transportation of insulating materials. The methods of cargo transportation are determined, specialized rolling stock is selected, a detailed analysis of the conditions necessary for the transportation of insulating materials by rail, road, sea and river transport is carried out. As a result, the most optimal and preferred transportation option is selected by comparing commercial work on transportation routes.
Keywords: *thermal insulation materials, specialized rolling stock, organization and technology of transportation, cost and time of transportation.*

Введение

Теплоизолирующие материалы – изделия, обладающие низкой теплопроводностью и предназначенные для тепловой изоляции зданий, сооружений, тепловых промышленных установок, технологического оборудования, холодильных камер, трубопроводов, транспортных средств и других объектов.

Теплоизолирующие материалы значительно улучшают комфорт в жилых помещениях. Важной целью теплоизоляции строительных конструкций является сокращение расхода энергии на отопление здания.

Последнее десятилетие РФ уверенно завоевывает рынок скандинавских стран по экспорту теплоизолирующих материалов. Ежегодные поставки этих материалов в европейские страны в среднем прирастает на 4%. Связано это, прежде всего относительной дешевизной российских товаров по сравнению с европейской продукцией того же ассортимента, а также готовность российского производителя своевременно и качественно приспосабливаться к европейским стандартам при производстве продукции. В этой связи актуальность совершенствования технологической схемы перевозки теплоизолирующих материалов из Российской Федерации в Данию вполне очевидна.

Обоснование вида транспорта и транспортных средств

Мультимодальные перевозки грузов – это из наиболее распространенных видов доставки товара несколькими видами транспорта. Для

мультимодальных перевозок грузов используются автомобили, подвижные составы, суда и самолеты. Комбинации могут быть самыми различными: это могут быть смешанные железнодорожно-водные перевозки грузов, смешанные перевозки ж/д – море, перевозки море – авто, перевозки авиа – авто, ж/д – авто, перевозки авиа – ж/д и т. д.

В статье рассматривается организация транспортировки теплоизолирующих материалов из Санкт-Петербурга в Копенгаген тремя маршрутами:

1. Смешанная перевозка (автомобильный и морской транспорт);

2. Прямая перевозка (железнодорожный транспорт);

3. Прямая перевозка (морской транспорт).

Следовательно, для осуществления перевозки по данным маршрутам будет использован следующий подвижной состав.

При транспортировке по маршруту № 1 будет использован седельный тягач Volvo FH13 с тентованным полуприцепом, SCHMITZ S.CS UNIVERSAL (16,5), а также паром SAILOR класса Passenger/Ro-Ro Cargo Ship. Транспорт представлен на рис. 1. Его технические характеристики приведены в табл. 1, 2 и 3.

При транспортировке по маршруту № 2 будет использован крытый ЦМВ модели 11-1807-01 или полувагон для технологической щепы модели 12-283. Они представлены на рис. 2. Технические характеристики приведены в табл. 4 и 5.

При транспортировке по маршруту № 3 будет использован контейнеровоз германского флага «IDA RAMBOW». Он представлен на рис. 3. А его технические характеристики приведены в табл. 6.

Транспортная маркировка груза

На каждое упакованное (грузовое) место должна быть нанесена маркировка, содержащая следующие данные:

а) наименование предприятия-изготовителя и его товарный знак;

б) наименование продукции;

в) номер партии;

г) количество продукции в упакованном месте (шт., м^3);

д) обозначение нормативно-технической документации на продукцию;

е) изображение государственного Знака качества по ГОСТ 1.9-67 для изделий, которым он присвоен в установленном порядке.

Рис. 1. Транспорт для перевозки теплоизолирующих материалов по маршруту № 1

Таблица 1

Технические характеристики тягача Volvo FH13

Характеристики	Показатели
Полный вес в составе автопоезда	44000 кг
Полный вес снаряженного авто	25,1 т
Собственная масса	19700 кг
Колесная формула	4×2
Количество осей	2
Тип двигателя	дизель
Колесная база	3500–3800 мм
длина колесной базы	3,7 м

Таблица 2

Технические характеристики полуприцепа SCHMITZ S. CS. UNIVERSAL (16,5)

Характеристики	Показатели
Собственный вес	7 000 кг
Полезная нагрузка	32 000 кг
Длина (внутренняя)	16 370 мм
Высота (внутренняя)	2 750 мм
Ширина (внутренняя)	2 499 мм
Высота ССУ (седла)	1 150 мм
Нагрузка на оси	27 000 кг
Объем	110 м3
Марка осей	Schmitz Rotos
Количество осей	3

Таблица 3

Технические характеристики парома SAILOR

Характеристики	Показатели
IMO номер	8401444
Имя судна	SAILOR
Тип	Passenger/Ro-Ro Cargo Ship
Год постройки	1987
Длина	157,6 м
Ширина	25 м
Мощность двигателей	2 х 7680 кВт
Предельная скорость	19 узлов
Количество палуб	8
Водоизмещение	20921 т
Дедвейт	8027 т

При необходимости маркирования каждого изделия, что должно указываться в нормативно-технической документации на конкретные виды продукции, содержание маркировки то же, что и для упакованного места, за исключением подпункта *г*.

Допускается наносить маркировку не на всех упакованных местах, но не менее чем на восьми, уложенных по четыре у дверей вагона с каждой стороны, при перевозке материалов и изделий одной партии в прямом железнодорожном сообщении.

Маркировку наносят одним из следующих способов:

– непосредственно на тару или на ярлык из фанеры и картона штемпелеванием или несмываемой краской по трафарету;

– на бумажную этикетку печатанием типографским способом.

Не допускается нанесение маркировки от руки, кроме проставления номера партии на этикетке или ярлыке.

Бумажную этикетку приклеивают на боковую поверхность упакованного места или вкладывают в конверт из прозрачного материала.

Ярлык привязывают проволокой или шпагатом к обвязке или планке ящика, обрешетки, щита.

Транспортная маркировка должна производиться по ГОСТ 14192-77 и, при необходимости, иметь манипуляционные знаки, основные, дополнительные и информационные надписи.

Необходимость нанесения и виды манипуляционных знаков устанавливают в нормативно-технической документации на конкретные виды продукции.

Рис. 2. Транспорт для перевозки теплоизолирующих материалов по маршруту № 2

Таблица 4

Технические характеристики крытого ЦМВ модели 11-1807-01

Характеристика	Показатели
Модель	11-1807-01
Габарит	1-ВМ
Грузоподъемность, т	66,7
Объем, м3	165,0
Внутренние размеры кузова (В/Ш/Д), мм	3400/2743/17600
Начало/окончание выпуска	2007/2016

Таблица 5

Технические характеристики полувагона для технологической щепы модели 12-283

Характеристика	Показатели
Модель	12-283
Габарит	1-ВМ
Грузоподъемность, т	63,0
Объем, м3	132,0
Внутренние размеры кузова (В/Ш/Д), мм	2994/2790/15750
Начало/окончание выпуска	1992/

Рис. 3. Транспорт для перевозки теплоизолирующих материалов по маршруту № 3

Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального варианта транспортировки теплоизолирующих материалов необходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки.

Описание маршрута № 1: Санкт-Петербург – порт Палдиски (Эстония) – автомобильный транспорт; порт Палдиски – порт Капельшер (Швеция) паромом; Капельшер – Стокгольм – Мальме – Копенгаген в тентованном полуприцепе на автомобиле. Общая протяженность маршрута составляет 1535 км.

Описание маршрута № 2: железнодорожная станция Санкт-Петербург – железнодорожная станция Копенгаген, через Беларусь, Польшу, Германию, в крытом вагоне и полувагоне. Общая протяженность маршрута составляет 2395 км.

Описание маршрута № 3: порт «Большой порт Санкт-Петербург» до порта Копенгаген – морским транспортом. Общая протяженность маршрута составляет 1225 км.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Расчет стоимости перевозки на железнодорожном транспорте проводился согласно тарифам, прописанным в Прейскуранте № 10-01, МТТ и СМГС [3, 6, 7].

Рис. 4. Общая схема маршрутов перевозки теплоизолирующих материалов

Таблица 6

Технические характеристики контейнеровоза «IDA RAMBOW»

Характеристики	Показатели
Тип судна	Container Ship
Строительный №	1274
Построено	14.09.2007
Флаг	Германия
Линия	UNIFEEDER A/S
Официальный номер	21460
Размер	149×23 м
Высота борта	11,30 м
Осадка	8,7 м
Валовая вместимость (Gross Tonnage)	11662 т
Чистая вместимость (Net Tonnage)	7284 т
Дедвейт (Deadweight, DWT)	13709 т
Reefer TEU	238
TEU	1008
Максимальная скорость	18,5 узлов

Расчет стоимости перевозки на автомобильном транспорте осуществлялся согласно тарифным ставкам, прописанным в Прейскуранте № 13-01-01, а при перевозке морским и речным транспортом по тарифам Прейскуранта № 14-01, а также на основе – базовой ставки фрахта, ставки за стоянку, стоимости хода судна, стоимости ПРР, расходов на оформление документации, портовых сборов, и различных видов надбавок [13, 14].

Определение времени на транспортирование определяется исходя из протяженности маршрута и скорости перевозки (на железнодорожном транспорте – 550 км/сутки, на автомобильном – 60 км/ч), а также на продолжительность перевозки влияет время на ПРР и время на переоформление документов.

Итоговые стоимость и время доставки по маршрутам

Маршрут № 1:

Протяженность маршрута: 1249 (авто) + 286 (море) = 1535 км

Общее время на транспортировку: 4 (авто) + 3 (море) = 7 сут.

Месячная стоимость маршрута составит 7460483,6 руб./мес.

Маршрут № 2:

Протяженность маршрута: 2395 км (ж.д.)

Общее время на транспортировку: 5 сут

Месячная стоимость маршрута составит: 2979471/ 2706511 руб./мес (крытый вагон/ полувагон).

Маршрут № 3:

Протяженность маршрута: 1225 км (море)

Общее время на транспортировку: 5 сут.

Месячная стоимость маршрута составит 2802512,1руб./мес.

Результаты анализа всех маршрутов по стоимостным и временным показателям представлены в табл. 7.

Таблица 7

Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок

№ маршрута	Вид транспорта	Количество подвижного состава, вид	Расстояние перевозки, км	Время перевозки, сут.	Стоимость, руб./месяц	Стоимость тонно-километра руб./т км	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (авто, море)	№ 1а Санкт-Петербург – порт Палдиски Порт Капельшер – Копенгаген	Седельный тягач Volvo FH13 и тентованный полуприцеп SCHMITZ S.CS UNIVERSAL (16,5)	1535	7	7460483,6	2,05	3,4
	№ 1б порт Палдиски – порт Капельшер	Паром SAILOR, класса Passenger/ Ro-Ro Cargo Ship					
№ 2 (ж.д.)	ж.д. станция Санкт-Петербург – ж.д. станция Копенгаген, через Беларусь, Польшу, Германию	Крытый ЦМВ модели 11-1807-01. Полувагон для технологической щепы модели 12-283	2395	5	2979471 2706511	3,75	5,34
№ 3 (море)	Санкт-Петербург – Копенгаген	Контейнеровоз «IDA RAMBOW»	1225	5	2802512,1	4,96	6,03

Анализ показателей перевозки на маршрутах

Маршрут № 1 с участием автомобильного и морского транспорта требует больших экономических затрат по сравнению с двумя другими. А также является самым длительным. Таким образом, выбор этого маршрута нерационален.

Маршрут № 2 и № 3 имеют примерно одинаковую стоимость и время транспортировки. Но из них наиболее экономичный – железнодорожный, в полувагонах.

Заключение

В данной статье были описаны основные транспортные характеристики теплоизолирующих материалов, маркировка. Также был подобран специализированный железнодорожный, автомобильный и морской транспорт.

Главной задачей стояло – организовать перевозку теплоизолирующих материалов из Санкт-Петербурга в Копенгаген с месячным объемом поставки 6120 упаковок. В качестве маршрутов было рассмотрено три вида перевозки, в результате был выбран оптимальный – Маршрут № 2 (ж.д. станция Санкт-Петербург – ж.д. станция Копенгаген, через Беларусь, Польшу, Германию), осуществляемый с помощью полувагона для технологической щепы модели 12-283. Месячная стоимость составила 2 706 511 рублей, а время на транспортировку одной партии 5 суток.

Библиографический список

1. ГОСТ 16381–77 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные.

2. ГОСТ 25880-83 Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение.

3. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Ч. 1, 2. М.: ПФ «Красный Пролетарий», 2003. (с изменениями на 31 января 2017 года).

4. Тарифное руководство № 4 (ред. от 25.01.2016) Книга 1 «Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог» (утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества).

5. Гармонизированная номенклатура грузов (ГНГ) (с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 июня 2020 г.)

6. Международный железнодорожный транзитный тариф. МТТ., Комитет ОСЖД, г. Варшава. 2001 (с изменениями и дополнениями на 01.01.2009). 110 с.

7. Соглашение о Международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). URL: https://docs.cntd.ru/document/1901924 (дата обращения: 23.11.22).

8. Устав железнодорожного транспорта Российской Федерации от 10.01.2003 № 18-ФЗ) (ред. от 23.07.2008).

9. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах (утв. МПС РФ 27.05.2003 №ЦМ-943) (с изм. от 23.10.2017).

10. Расчет расстояний РЖД. URL: cargo.rzd.ru. (дата обращения: 19.11.2022).

11. База данных для морских перевозок. URL: www.marinetraffic.com (дата обращения: 20.11.2022).

12. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 № 81-ФЗ (ред. от 18.07.2011).

13. Расчет тонно-километров онлайн калькулятор. URL: https://www.center-pss.ru/math/tonno-kilometri.htm (дата обращения: 24.11.2022).

14. Международный фрахтовый брокер – сервисы для транспортных компаний, ставки фрахта, трекинг контейнеров, контейнерные перевозки. URL: https://www.searates.com (дата обращения: 24.11.2022).

УДК 655.581

Я. И. Панкова*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛАСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В МЕГАПОЛИСЕ НА ОСНОВЕ РИНЦ И БАЗЫ ДАННЫХ SCOPUS

В статье представлен анализ публикационной активности в области пассажирских перевозок в мегаполисе на основе российского индекса научного цитирования и базы данных Scopus. Актуальность данной области исследования заключается в росте числа пассажиров в связи с развитием города, в увеличении нагрузки на пассажирский транспорт в больших городах, в проблемах с оказанием транспортных услуг населению.
Ключевые слова: *пассажирские перевозки в мегаполисе, исследование пассажирских перевозок, пассажирские перевозки, дорожная сеть мегаполиса, транспортная сеть мегаполиса, городской пассажирский транспорт, пассажиропоток, автомобилизация.*

Y. I. Pankova*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF PUBLICATION ACTIVITY IN THE FIELD OF PASSENGER TRANSPORTATION IN THE METROPOLIS BASED ON THE RSCI AND THE SCOPUS DATABASE

The article presents an analysis of publication activity in the field of passenger transportation in the metropolis based on the Russian scientific citation index and the Scopus database. The relevance of this field of research lies in: the growth of the number of passengers and the development of the city, the increase in the load on passenger transport in large cities, problems with the provision of transport services to the population.
Keywords: *metropolitan passenger traffic, passenger traffic research, passenger traffic, metropolitan road network, metropolitan transport network, urban passenger transport; passenger traffic.*

Введение

Наукометрическая база данных Scopus является самой популярной базой данных в России на сегодняшний день. Scopus представляет собой крупнейшую в мире по количеству и качеству рецензируемой литературы наукометрическую базу данных. Scopus – это крупнейшая база данных, содержащая краткое описание и сведения о цитировании рецензируемой литературы: научных журналов, книг и материалов конференций. Обеспечивая всесторонний обзор результатов мировых исследований в различных областях науки, техники, медицины, социологии, искусства и гуманитарных знаний, Scopus предлагает интеллектуальные средства отслеживания, анализа и визуализации исследований [1].

Работа в программе VOSviewer

С помощью ключевых слов из файла Scopus составляем схему в программе VOSviewer. Выбираем способ создания карты, основанный на библиографических данных и тип анализа по ключевым словам. Таким образом, получаем карту ключевых слов, представленную на рис. 1 [2].

1. Для начала определяется тип данных на основе библиографических данных.

2. Теперь выбирается источник данных из файлов Scopus.

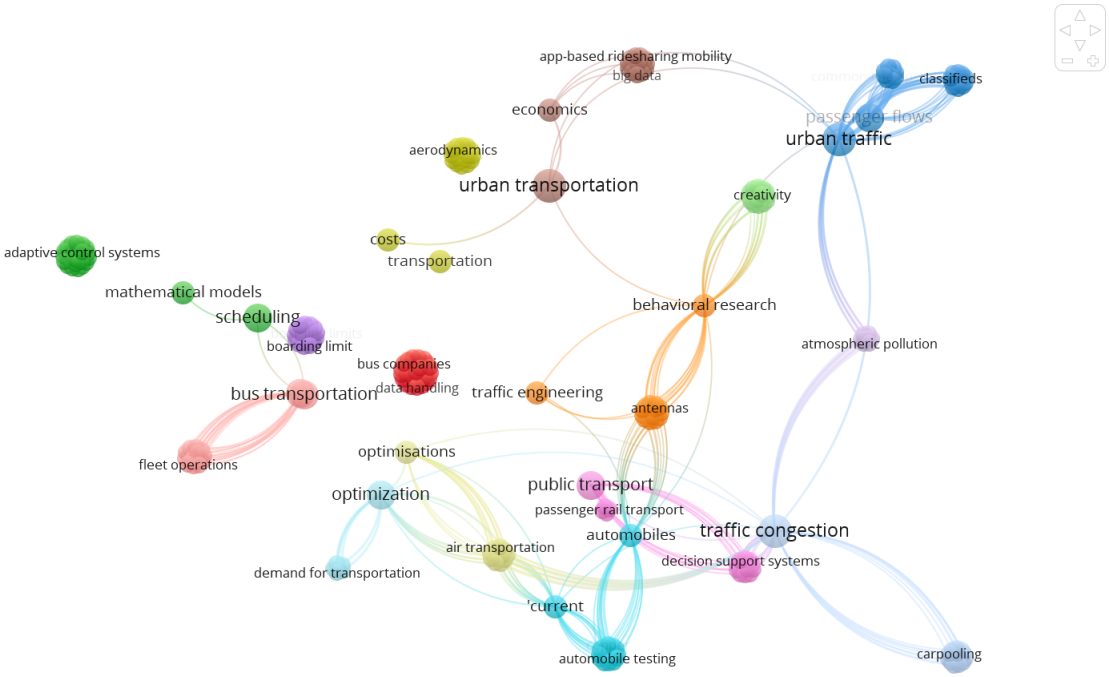


Рис. 1. Визуализация сети для наукометрической картины по ключевым словам

3. Затем выбирается тип анализа, количество авторов и производится проверка выбранных авторов.

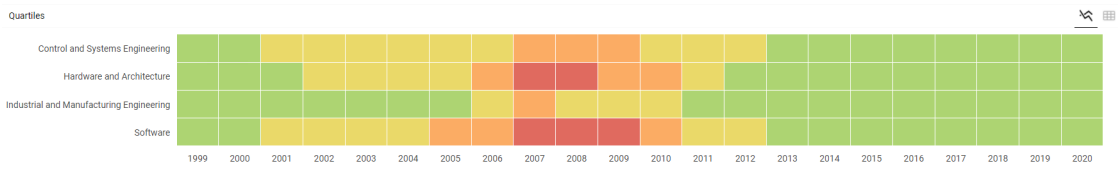
4. Получается карта по выбранным критериям.

Наукометрическая картина показывает наличие научных связей, направление научных исследований и их динамику.

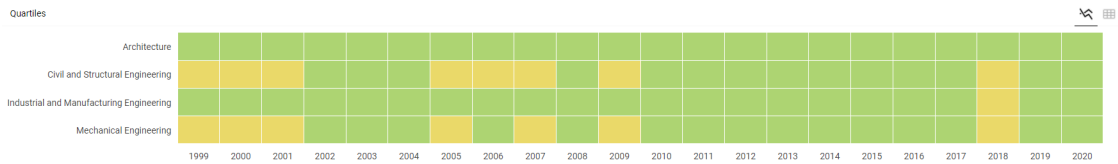
Работа в информационной системе https://www.scimagojr.com/

На основе информационной системы https://www.scimagojr.com/ произведено ранжирование публикаций по значимости в рейтингах. [3] Для РИНЦ – по цитируемости [4].

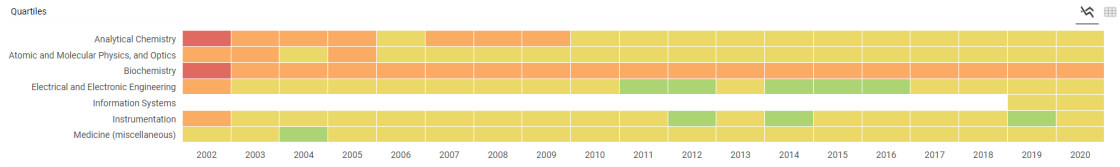
Квартиль Q1:
Journal of Manufacturing Systems



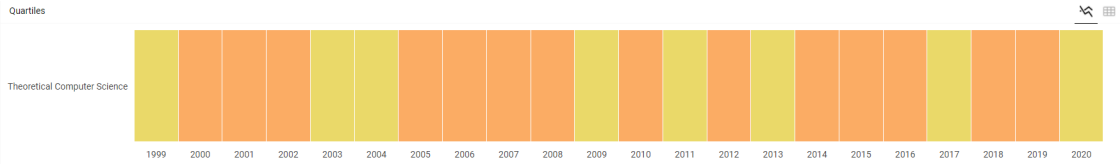
Research in Engineering Design – Theory, Applications, and Concurrent Engineering



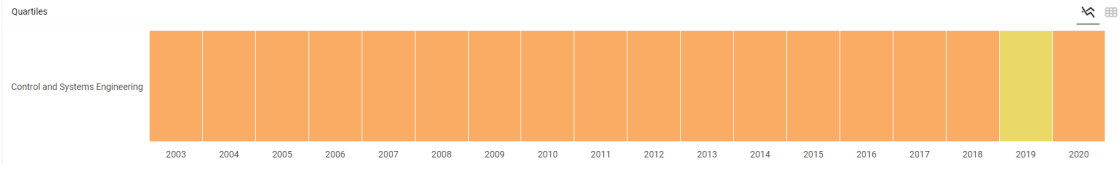
Transportation Research Part C: Emerging Technologies
Квартиль Q2:
Sensors



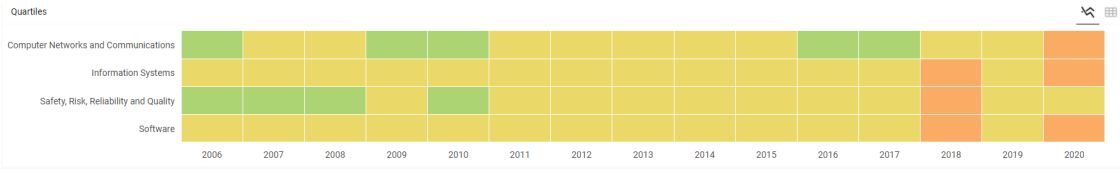
Journal of Experimental Algorithmics



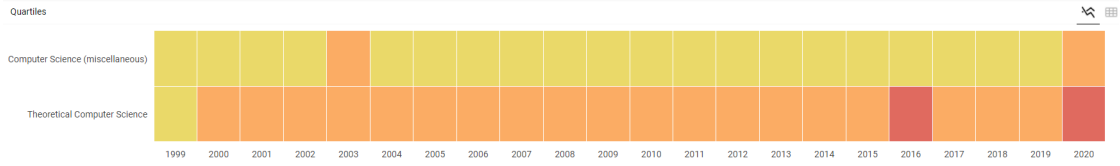
Квартиль Q3:
IFAC-PapersOnLine



International Journal of Information Security



Квартиль Q4:
Electronic Notes in Theoretical Computer Science



Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology

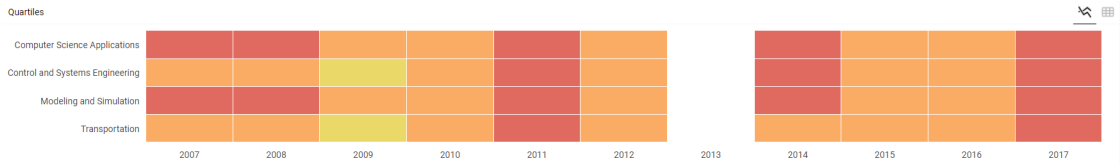


Таблица 1

Статьи РИНЦ

№	Журнал	Вып.	Публ.	Цит.
1	Institute of Electrical and Electronics Engineers	82	247	11819
2	Journal of Manufacturing Systems Elsevier Science Publishing Company, Inc.	64	227	4313
3	Transportation Research Part C: Emerging Technologies Elsevier Science Publishing Company, Inc.	86	196	7780
4	Machine Learning Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V.	177	791	32350
5	Numerische Mathematik Springer-Verlag GmbH	335	1189	23836
6	Design Studies Elsevier Science Publishing Company, Inc.	22	37	2082

Description	Results
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
Timespan	2020:2021
Sources (Journals, Books, etc)	7
Documents	9
Average years from publication	0.222
Average citations per documents	0
Average citations per year per doc	0
References	281
DOCUMENT TYPES	
article	5
conference paper	3
review	1
DOCUMENT CONTENTS	
Keywords Plus (ID)	128
Author's Keywords (DE)	59
AUTHORS	
Authors	23
Author Appearances	23
Authors of single-authored documents	2
Authors of multi-authored documents	21
AUTHORS COLLABORATION	
Single-authored documents	2
Documents per Author	0.391
Authors per Document	2.56

Рис. 2. Основная информация из файла Scopus

Квартиль (Q) – степень престижности, популярности журнала в базе данных Scopus/Web of Science. Всего 4 квартиля – Q1, Q2, Q3 и Q4, где Q1 – самый высокий квартиль, Q4 – самый низкий. В Scopus квартилями обладают журналы, которые индексируются в нем 3 года и более [5].

Работа в системе Bibliometrix

По данным из карты VOSviewer и словам в Scopus проводится анализ с помощью Bibliometrix [6]. На рис. 2 представлена основная информация, полученная из файла Scopus за период с 2020 по 2021 гг.

По этим данным можно получить такие сведения как среднее цитирование, количество авторов и другое. Также можно проследить скорость роста количества статей по теме исследования, представленная на рис. 3.

На рис. 4 представлено среднее количество цитирований статей в год. Пик цитирований приходится на 2020 год. Можно сделать вывод о том, что цитирование увеличилось.

Исходя из полученных результатов, можно увидеть, что в период с 2018 по 2021 год было 6 цитирований. Можно получить данные по индексу Хирша авторов этой темы, представленные в табл. 2.

Из проведенного исследования на основе информационных систем https://www.scimagojr.com/, VOSviewer и Bibliometrix было произведено ранжирование публикаций по значимости в

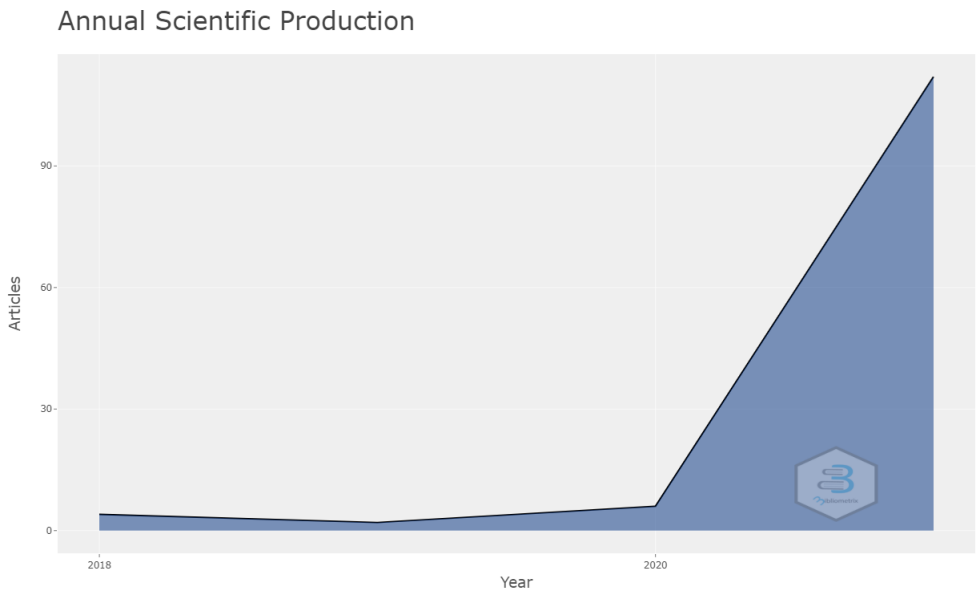


Рис. 3. Скорость роста в период с 2018 по 2021 гг.

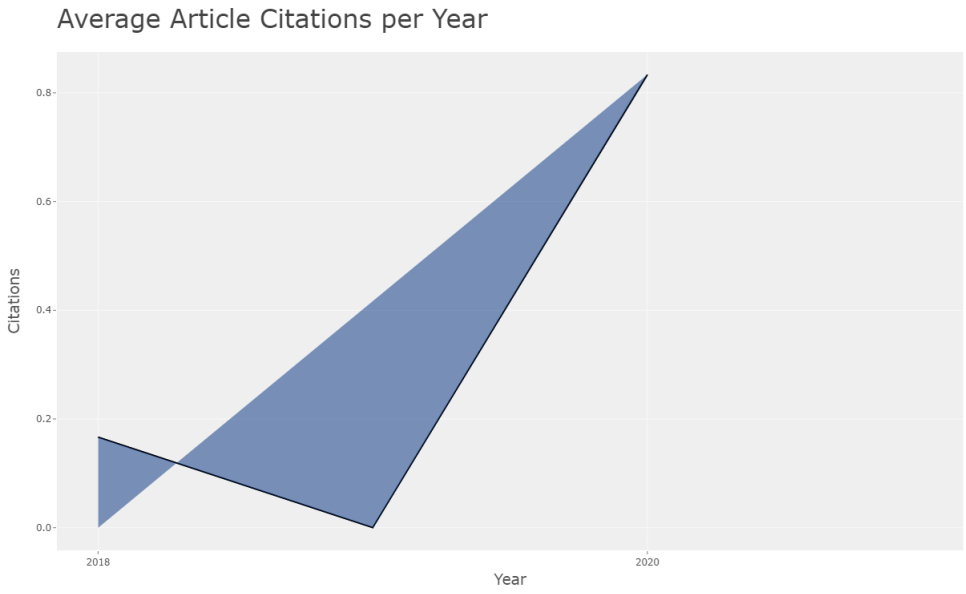


Рис. 4. Среднее количество цитирований статей в год

Year	N	MeanTCperArt	MeanTCperYear	CitableYears
2018	4	0.5	0.166666666666667	3
2019	2	0	0	2
2020	6	0.833333333333333	0.833333333333333	1
2021	112	0.00892857142857143		0

Рис. 5. Количество цитирований за 2018-2021 гг.

Таблица 2

Индекс Хирша авторов в период с 2018 по 2021 год

Element	h_index	g_index	m_index	TC	NP	PY_start
ABERNETHY K	1	1	1	1	1	2021
BAKARR MI	1	1	1	1	1	2021
BENNETT EL	1	1	1	1	1	2021
BENTEZ-LPEZ A	1	1	1	1	1	2021
BODMER R	1	1	1	1	1	2021
COAD L	1	1	1	1	1	2021
COWLISHAW G	1	1	1	1	1	2021
EL BIZRI HR	1	1	1	1	1	2021
ENOUZ HP	1	1	0,25	2	1	2018
EVES HE	1	1	1	1	1	2021
FA JE	1	1	1	1	1	2021
GOLDEN CD	1	1	1	1	1	2021
INGRAM DJ	1	1	1	1	1	2021
IPONGA DM	1	1	1	1	1	2021
MILNER-GULLAND EJ	1	1	1	1	1	2021
MINH NV	1	1	1	1	1	2021
MORCATTY TQ	1	1	1	1	1	2021
MWINYIHALI R	1	1	1	1	1	2021
NASI R	1	1	1	1	1	2021
NIJMAN V	1	1	1	1	1	2021

рейтингах, созданы карты ключевых слов, на их основе было отражено наличие научных связей, направление научных исследований и их динамику, получены аналитические графики функций и аналитическая информация (среднее цитирование, рост темы и т. д.)

Заключение

В результате данного исследования можно сделать вывод о том, что по данным VOSviewer тема является достаточно актуальной из-за большого количества публикаций по данным ключевым словам, также высокая престижность источников, в которых публикуются различные работы, связанные с темой исследования, однако, по данным Bibliometrix скорость роста темы, а также цитируемость за последний год снизились.

Библиографический список

1. Scopus URL: https://www.elsevier.com/solutions/scopus (дата обращения: 18.11.2022).

2. VOSviewer URL: https://www.vosviewer.com/ (дата обращения: 20.11.2022).

3. Scimago Journal & Country Rank. URL: https://www.scimagojr.com/ (дата обращения: 21.11.2022).

4. Российский индекс научного цитирования: URL: https://www.elibrary.ru/ (дата обращения: 21.11.2022).

5. Scopus Preview. URL: https://www.scopus.com/ (дата обращения: 23.11.2022).

6. Bibliometrix. URL: https://www.bibliometrix.org/ (дата обращения: 25.11.2022).

УДК 652.02

Э. А. Пиль*
доктор технических наук, профессор
И. Т. Козюличев*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА МАРШРУТА ДОСТАВКИ ПАССАЖИРОВ В КАМПУС СПБГУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУННОГО ТРАНСПОРТА

В статье рассматривается вопрос современного развития городского наземного транспорта с использованием струнного транспорта, что значительно дешевле строительства метрополитена, позволит сократить количество пробок на дорогах до минимума и улучшит городскую экологическую ситуацию.
Ключевые слова: *струнный транспорт, кампус СПбГУ, город Пушкин.*

E. A. Pil*
Dr. Sc., Tech., Professor
I. T. Kozuylichev*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DEVELOPMENT OF A ROUTE FOR DELIVERING PASSENGERS TO THE ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY CAMPUS USING SKYWAY TRANSPORT

The article deals with the issue of modern development of urban land transport using SkyWay transport, which is much cheaper than the construction of the subway, will reduce the number of traffic jams to a minimum and improve the urban environmental situation.
Keywords: *skyway transport, St. Petersburg State University campus, Pushkin city.*

Одним из перспективных направлений развития инфраструктуры городского транспорта является использование транспорта на магнитной подушке и струнного транспорта [1, 2, 3]. В представленной ниже статье рассмотрен вопрос использования струнной дороги для перевозки пассажиров из города Санкт-Петербурга в город Пушкин и далее в город Колпино, где, согласно планам, будет построен современный кампус Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ), в котором смогут жить, учиться и работать 25000 студентов, 4000 педагогов и 4000 обеспечивающего персонала. Кроме того, концепцией было предусмотрено создание больницы, конгресс-центра и спортивного комплекса с бассейном и крытым катком [4]. В связи с чем и встает вопрос создания удобной, современной транспортной инфраструктуры, которая позволит быстро и комфортно доставлять сотрудников и студентов в этот кампус из Санкт-Петербурга. Здесь также следует напомнить, что в городе Пушкине расположен известный архитектурный дворцово-парковый ансамбль со знаменитой Янтарной комнатой, которая притягивает к себе большое количество туристов и гостей нашего города.

Теперь сделаем краткий экскурс о том, что представляет из себя струнный транспорт. В настоящее время транспорт стал частью современной жизни человека в особенности в больших городах.

При всех его положительных качествах, современный транспорт преподносит нам много различных проблем, которые до сих пор не могут решить во всем мире.

Недостатки традиционного транспорта

Рассмотрим автомобили и автобусы. Используя этот широко распространенный вид транс-

порта, мы мало задумываемся о его серьезных недостатках, таких как:

– высокая опасность. Личный транспорт ежегодно уносит почти 1,4 миллиона жизней во всем мире, а еще больше людей становятся калеками;

– удар по экологии. 40–60% загрязнений атмосферы Земли приходится на долю выхлопных автомобильных газов, от которых в большинстве случаев страдает население больших городов;

– низкая эффективность. КПД бензиновых двигателей около 20%, а дизельного почти 40% и это максимум на что они способны;

–пробки. Ежедневные транспортный пробки на дорогах приводят к тому, что людям приходиться тратить по несколько часов на дорогу, чтобы добраться от дома до работы и обратно.

Согласно данным компании Tom Tom, которая опубликовала рейтинг загруженности дорог городов мира за 2018 год, на первом месте оказался индийский город Мумбай, в котором индекс загруженности составляет 65% (сравнение среднего времени передвижения по свободным и загруженным дорогам при аналогичном маршруте). На вторым месте с самыми глухими пробками стала столица Колумбии – Богота, в котором в утренние часы пик водители там тратят по 26 минут на каждые полчаса поездки по городу, а вечером – 31 минуту. Наша столица Москва находится в этом рейтинге на пятом месте – 5%. Эту проблему не могут решить с начала использования двигателей внутреннего сгорания. Поэтому надо пойти другим путем, заменив традиционный вид городского транспорта, и применить новый вид транспорта, к которому относится струнный транспорт.

Струнный транспорт будущего SkyWay

SkyWay – это инновационная транспортная система, разработанная белорусским инженером-конструктором Юницким А. Э., на которую он потратил более 40 лет своей жизни и которую на сегодняшний день он уже воплотил в реальность. Теперь рассмотрим более подробно, что представляет из себя этот новый вид транспорта. Струнный транспорт представляет собой небольшие модули, которые легко и без усилий скользят над землей по установленным на опорах рельсо-струнным конструкциям. Их скорость модулей может составлять от 150 км/ч. в городских условиях, а при междугородных высокоскоростных перевозках до 500 км/ч., что значительно больше по сравнению с максимальной скоростью метрополитена – 80 км/ч.

В представленном автором видео показана транспортная система SkyWay в действии, где кабины с пассажирами двигаются легко и непринужденно [5].

Автором были также разработаны несколько вариантов/классов системы струнного транспорта, в зависимости от грузоподъемности и пассажировместимости рельсовых автомобилей:

– до 3 человек или до 0,5 т груза (сверхлегкий);

– до 10 человек или до 2,5 т груза (легкий);

– до 25 человек или до 5 т груза (средний);

– до 50 человек или до 10 т груза (тяжелый);

– до 500 человек или до 10000 т груза (сверхтяжелый).

Произведенные расчеты показали, что использование струнного транспорта позволяет перевозить от 10000 пассажиров в сутки до 2 млн пассажиров в сутки, что сопоставимо с перевозкой пассажиров в метрополитене [6].

Из представленного выше материала можно сделать вывод, что струнный транспорт является очень перспективным направлением, как в городах с большим количеством населения, так и в других городах, где проблемы с автомобильными пробками стоят перед руководителями, на чьи плечи возложена структура городского транспорта и логистики (рис. 1).

Теперь вернемся к созданию струнного транспорта, который свяжет Санкт-Петербург с кампусом СПбГУ, его целесообразно построить от станции метро “Купчино” над транспортной магистралью, по которой перемещаются городские автобусные маршруты в сторону города Пушкин, что не потребует выделений дополнительной земельной территории, как это предполагалось, в случае строительства скоростного трамвая [7].

При прокладке пути струнного транспорта, следует учесть, что в городе Пушкин расположены также другие учебные заведения и НИИ такие как: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; Федеральный исследовательский центр «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова»; Всероссийский научно-исследовательский институт генетики и разведения сельскохозяйственных животных; Военно-морской политехнический институт ВУНЦ ВМФ ВМА и Санкт-Петербургский гуманитарный университет им. Петра Великого. Согласно городскому плану, кампус СПбГУ должен будет располагаться между городами Пушкин и Колпино (рис. 2) [8].

Рис. 1. Виды струнного транспорта

Рис. 2. План кампуса СПбГУ

Поэтому при проектировании маршрута струнной дороги надо учесть, чтобы она, по возможности, соединила все из перечисленных выше учебных заведений, НИИ, а также дворцово-парковый ансамбль.

Поэтому здесь можно рекомендовать следующий маршрут струнной дороги:

– метро “Купчино”;
– ул. Малая;
– ул. Набережная;
– через мост;
– пер. Советский;
– бульвар Софийский;
– налево до Московского шоссе;
– переезд через Витебскую железную дорогу до Кампуса рядом с Пушкино;
– до железнодорожного вокзала Колпино (конечная остановка).

Из рис. 3 видно, что предлагаемый маршрут позволит связать две железнодорожные ветки электричек и поможет пассажирам быстрее добраться от железнодорожного вокзала “Колпино”, до города Пушкин и при необходимости далее.

Разберем более подробно маршрут и рассчитаем показатели, необходимые нам для анализа.

Таблица 1

Расстояние между остановками на маршруте

Отрезки маршрута	Расстояние, км
ст. метро “Купчино” – ул. Малая 14,04	
ул. Малая – ул. Набережная	0,6
ул. Набережная – пер. Советский	0,3
пер. Советский – бульв. Софийский	1,3
бульв. Софийский – Московское шоссе	1,1
Московское шоссе – Ж/Д вокзал Колпино	12,8
Всего:	30,1

В табл. 2 сведены расчеты по времени прохождения маршрута струнным транспортом при разных скоростях.

Кроме расчетов, произведенных выше, отражающих время непосредственного движения транспортного средства между остановками, стоит учесть время посадки/высадки пассажиров. Здесь сразу стоит отметить, что в разные часы дня, этот показатель меняется, в зависимости от количества пассажиров и загруженности маршрута.

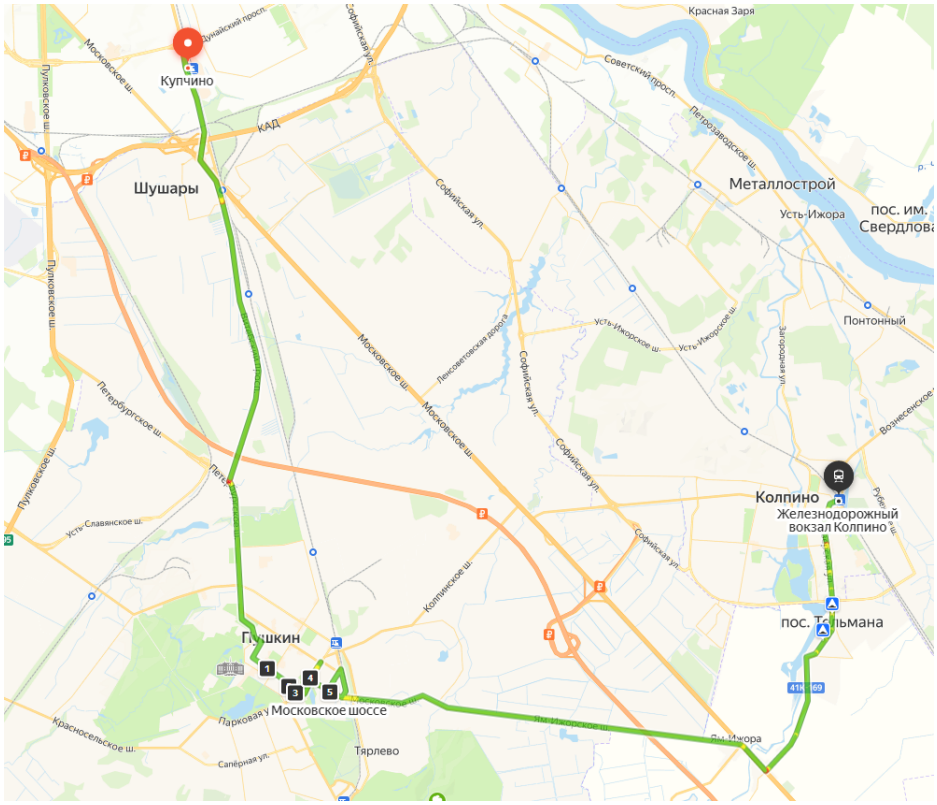


Рис. 3. Маршрут движения от ст. м. Купчино до Ж/Д вокзала Колпино

Таблица 2

Время прохождения маршрута струнным транспортом при разных скоростях

Участки маршрута	Расстояние, км	Скорость движения			
		50 км/ч	60 км/ч	70 км/ч	80 км/ч
		*t*1	*t*2	*t*3	*t*4
ст. метро “Купчино” – ул. Малая	14,04	16,8 мин.	14,04 мин.	12 мин.	10,8 мин.
ул. Малая – ул. Набережная	0,6	0,72 мин.	0,6 мин.	0,54 мин.	0,48 мин.
ул. Набережная – пер. Советский	0,3	0,36 мин.	0,3 мин.	0,24 мин.	0,23 мин.
пер. Советский – бульв. Софийский	1,3	1,56 мин.	1,32 мин	1,14 мин.	0,96 мин.
бульв. Софийский – Московское шоссе	1,1	1,32 мин.	1,08 мин.	0,96 мин.	0,84 мин.
Московское шоссе – Ж/Д вокзал Колпино	12,8	15,36 мин.	12,78 мин.	10,92 мин.	9,6 мин.
Всего:	30,1	36 мин.	30 мин.	26 мин.	23 мин.

Примем, что в “час пик”, т. е. в период с 7 до 8 часов утра и с 17 до 18 часов вечера – время посадки/высадки пассажиров будет равным 1 минуте 30 секундам, тогда как в “обычное время” на это будет тратиться не более 40 секунд.

Получив время прохождения маршрута струнным транспортом, можно сравнить его с временем общественного и личного транспорта.

Пользуясь личным транспортом, данный маршрут можно преодолеть не менее, чем за два часа в “часы пик”, и не менее чем за 1 час в

Таблица 3

Время прохождения маршрута включая посадку/высадку пассажиров

Временные интервалы	Скорость движения			
	50 км/ч	60 км/ч	70 км/ч	80 км/ч
	*t*1	*t*2	*t*3	*t*4
“Час пик” 7:00–8:00 17:00–18:00	46 мин. 30 сек.	40 мин. 30 сек.	37 мин. 30 сек.	34 мин. 30 сек.
12:00–15:00	39 мин. 30 сек.	33 мин. 30 сек.	29 мин. 30 сек.	26 мин. 30 сек.

остальное время. Что касается общественного транспорта, то, основываясь на данных сервиса для поиска мест и маршрутов “Яндекс Карты” [9], можно судить о том, что путь с множественными пересадками займет, в лучшем случае, около 3 часов. Поэтому при выборе варианта поездки стоит отдать предпочтение струнному транспорту.

Библиографический список

1. В Китае создали самый быстрый в мире поезд на магнитной подушке. URL: https://yandex.ru/news/story/VKitae_sozdali_samyj_bystryj_vmire_poezd_namagnitnoj_podushke--e7075948 a478dad941d316d3d4a70912?lang=ru&rubric= index&fan=1&stid =morp-5ZrDlIR4Yg340idZ&t=162680 1788 &tt=true& persistent_id=153632319 (дата обращения: 30.11.2022).

2. Китай запустил первый в мире «небесный» поезд. URL: https://weekend.rambler.ru /items/49167957-kitay-zapustil-pervyy-v-mire-nebesnyy-poezd/?utm_source=RCM-122C&from=RCM-122C&utm_campaign=rcmc648cbf9 (дата обращения: 30.11.2022).

3. Струнная дорога над городом. URL: http://vechorka.ru/article/strunnaya-doroga-nad-gorodom/ (дата обращения: 30.11.2022).

4. СПбГУ переедет в кампус у города Пушкин – теперь официально. URL: https://www.sobaka.ru/city/city/97451 (дата обращения: 30.11.2022).

5. Струнный транспорт SkyWay: разработка, которая навсегда изменит мир. URL: https://www.techcult.ru/technology/7235-strunnyj-transport-skyway (дата обращения: 30.11.2022).

6. Струнный транспорт Юницкого. URL: http://cyclowiki.org/wiki/%D0%A1%D1%_f-eFx7CUH2aHiavXgTBgkbw8F6r7DAE4zK3O12xpEl7Ou9fACtFt4xKKmuFl0_JWdMFxLMUrcwy0 (дата обращения: 30.11.2022).

7. К новому кампусу СПбГУ обещают пустить скоростной трамвай. URL: https://www.rosbalt.ru/piter/2019/10/11/1807200.html (дата обращения: 30.11.2022).

8. Снова про единый кампус СПбГУ. URL: https://iuni.spb.ru/2020/09/09/snova-pro-edinyj-kampus-spbgu/ (дата обращения: 30.11.2022).

9. Яндекс Карты – транспорт, навигация, поиск мест. URL: https://yandex.ru/maps (дата обращения: 30.11.2022).

УДК 652.02

Э. А. Пиль*
доктор технических наук, профессор
И. Г. Мальков*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РАЗРАБОТКА КРУГОВОГО МАРШРУТА НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА НА МАГНИТНОЙ ПОДУШКЕ ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

В статье рассматривается вопрос построения круговой линии с использованием наземного транспорта на магнитной подушке, что значительно дешевле строительства метрополитена. Транспорт на магнитной подушке позволит сократить количество пробок на дорогах до минимума и улучшит городскую экологическую ситуацию.
Ключевые слова: *круговая дорога, поезд на магнитной подушке, Санкт-Петербург.*

E. A. Pil*
Dr. Sc., Tech., Professor
I. G. Malkov*
Postgraduate Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DESIGN OF A CIRCULAR ROUTE OF GROUND TRANSPORT ON A MAGNETIC CUSHION FOR ST. PETERSBURG

The article discusses the issue of building a circular line using ground transport on a magnetic cushion, which is much cheaper than building a subway, which will reduce the number of traffic jams to a minimum and improve the urban environmental situation.
Keywords: *circular road, magnetic cushion train, St. Petersburg.*

Одним из перспективных направлений развития инфраструктуры городского транспорта является использование транспорта на магнитной подушке и струнного транспорта [1]. В статье, представленной ниже, освещен вопрос использования поездов на магнитной подушке, что позволяет снижать шум, ввиду того, что транспорт не касаться поверхности рельса при движении. Китай запускает первый в мире «небесный поезд» на магнитной подвеске, который парит в воздухе с помощью магнитов, сообщает South China Morning Post (рис. 1).

В отличие от большинства существующих подвесных линий, рельс китайского поезда расположен на высоте около 10 м над землей. Физического контакта у поезда с рельсом нет, транспорт движется под рельсом со скоростью 80 км/ч. Построенная в Синго железная дорога, работает на постоянной силе мощных неодимовых магнитов, которой достаточно, чтобы поднять состав с 88 пассажирами. Протяженность экспериментальной трассы составляет 800 м.

Благодаря отсутствию трения с рельсом для движения поезда требуется лишь небольшое количество электроэнергии. По словам ученых, новая технология магнитной подвески генерирует небольшое количество электромагнитного излучения, а стоимость строительства такой дороги в десять раз меньше, чем стоимость строительства метро. Также ученые отмечают, что поезд на магнитной подвеске может быть на 50% быстрее метро. Некоторые поезда на магнитной подушке могут развивать скорость до 600 км/ч [2].

Аналогичные разработки ведутся и в России. Разработка монорельсовой транспортной системы в настоящее время ведется Московским институтом теплотехники (рис. 2). Эта система обладает рядом преимуществ перед современным городским транспортом. В частности, быстротой строительства и ввода в эксплуатацию, пониженным уровнем шума, экологической чистотой и низким энергопотреблением, говорится на сайте «Роскосмоса» [3]. Еще такой

Рис. 1. Китайский поезд на магнитной подушке

Рис. 2. Опытная линия поезда на магнитной подушке в Москве

поезд сможет работать в беспилотном режиме, и в целом он требует минимального обслуживания подвижного состава и эстакады. Вид разработки представлен на рис. 1.

Как видно из краткого описания поездов на магнитной подушке, у него большие перспективы для внедрения в городах с большим населением и интенсивным наземным транспортом.

В Санкт-Петербурге уже давно поднимается вопрос создания кольцевой ветки метро, строительство которой планируют закончить только к 2040 году. Поэтому здесь будет рассмотрен вопрос выбора маршрута кольцевого поезда на магнитной подушке, что позволит осуществить этот грандиозный проект намного раньше и сократить значительные финансы, которые можно будет использовать в других областях науки, техники, искусства, спорта и т. д.

Существует несколько перспективных планов кольцевой ветки метро, но более интересна та, которая позволяет соединить различные ветки метро, которые уже эксплуатируются и планируются к запуску в эксплуатацию в ближайшее десятилетие. Такой план представлен на рис. 3.

Предлагаемая новая схема наземной круговой ветки с использованием поездов на магнитной подушке позволит более полно связать железнодорожные пути электричек, подземных станций метрополитена, а также большие массивы новостроек, что значительно разгрузит наземный общественный транспорт и сократит время пассажиров при их перемещении по городу. Кроме того, сократиться шум от наземного транспорта, уменьшится количество пробок и заторов, а также улучшится экология воздушного пространства. В новом кольцевом варианте предлагается построить в первую очередь ветку от метро Ломоносовская по Ивановской улице в сторону Фрунзенского района по про-

Рис. 3. Перспективный план развития метро в Санкт-Петербурге

Рис. 4. Подвесная дорога в городе Вуппераль, Германия

спекту Славы, а далее через Московский район с выходом на Ленинский проспект и до его конца. Эта линия будет пересекаться с тремя железнодорожными путями: Октябрьской железной дорогой, Витебской железной дорогой и Балтийской железной дорогой. А также со следующими станциями метро: Ломоносовская, проспект Славы, Московская и Ленинский проспект. Последнюю остановку следует сделать на перекрестке проспекта Патриотов и Ленинского проспекта. После чего следует повернуть ветку до улицы Маршала Казакова и далее в направлении рынка Юнона и через железнодорожный мост к станции метро Автово. После

свернуть до железнодорожной станции Броневая, после которой ветка сворачивает налево к станции метро Нарвская. От метро Нарвская идет до улицы Двинская. Далее пересекает Большой проспект, соединяется с Василеостровской, Спортивной и Петроградской. После делает остановку на улице Кантемировской, соединяется с метро Лесная, а далее пересекает улицу Арсенальная и выходит на Калининскую площадь. Следующая остановка будет Полюстровский и Большеохтинский проспекты с выходом на Ладожский вокзал. Следующей остановкой будет Дальневосточный проспект с выходом на Народную улицу. Таким образом круговая ветвь замкнулась (рис. 3).

Ниже можно увидеть фотографии подвесной дороги, которая была открыта в 1901 году в городе Вуппераль, Германия. Это одна из старейших монорельсовых дорог в мире, до сих пор действующая (рис. 4). При использовании кольцевой дороги можно продавать одноразовые билеты на нее, билет на один день с пересадками на метро и проездные билеты на месяц.

Библиографический список

1. В Китае создали самый быстрый в мире поезд на магнитной подушке. URL: https://yandex.ru/news/story/VKitae_sozdali_samyj_bystryj_vmire_poezd_namag nitnoj_podushke--e7075948a478dad941d316d3d4a70912?lang=ru&rubric= index&fan=1&stid =morp 5ZrDlIR4Yg340id Z&t=1626801788&tt=true& (дата обращения: 01.12.2022).

2. Китай запустил первый в мире «небесный» поезд. URL: https://weekend.rambler.ru /items/49167957-kitay-zapustil-pervyy-v-mire-nebesnyy-poezd/?utm_source= RCM-122C&from=RCM-122C&utm_campaign=rcmc648cbf9 (дата обращения: 01.12.2022).

3. В России начались испытания поезда на магнитной подушке. URL: https://hi-tech.mail.ru/news/55219-v-rossii-nachalis-ispytaniya-poezda-na-magnitnoy-podushke/?utm_ campaign= media&utm_referrer= https%3A%2F%2Fpulse.mail.ru&utm_source=pulse_mail_ru (дата обращения: 01.12.2022).

4. Альтернативный транспорт: Вуппертальская подвесная дорога. URL: https://kolpino.ru/news/2/alternativnyy-transport-vuppertalskaya-podvesnaya-doroga/ (дата обращения: 01.12.2022).

УДК 658.5 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-249-253**

В. В. Рубинов*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

В статье рассматривается система работы с твердыми коммунальными отходами в мегаполисах, как сложная, стохастическая система, охваченная множеством обратных связей. Рассмотрен технологический процесс работы с отходами, сформулированы основные направления оптимизации системы, оценена роль и необходимость применения информационно-измерительных систем в технологическом процессе. Приведена классификация и описаны существующие информационно-измерительные системы в системе работы с отходами, сформулированы системные проблемы в области информационно-измерительных систем и направления их решения.
Ключевые слова: *твердые коммунальные отходы, мусор, система обращения отходов, транспортное предприятие, переработка, системы массового обслуживания, математические модели, система двухэтапного вывоза, эффективность, многоканальная система массового обслуживания с очередью, уровни планирования.*

V. V. Rubinov*
PhD Student
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF WORKING WITH MUNICIPAL SOLID WASTE

The article considers the system of work with municipal solid waste in megacities as a complex, stochastic system covered by many feedbacks. The technological process of working with waste is considered, the main directions for optimizing the system are formulated, the role and necessity of using information-measuring systems in the technological process is assessed. The classification and description of existing information-measuring systems in the waste management system are given, systemic problems in the field of information-measuring systems and directions for their solution are formulated.
Keywords: *municipal solid waste, garbage, waste management system, transport enterprise, processing, queuing systems, mathematical models, two-stage removal system, efficiency, multi-channel queuing system, planning levels.*

Введение

Ежедневно по всему миру производится огромное количество отходов. Вопросам, касающимся утилизации твердых бытовых отходов, уделяется особое внимание. Организация процесса работы с отходами, одна из серьезнейших задач на стыке бизнеса и государства [1].

Вывоз отходов из крупных мегаполисов, таких как Санкт-Петербург, в большинстве случаев организован по двухступенчатой модели, где первая ступень – это транспортировка отходов до перегрузов или станций обработки отходов, а вторая – транспортировка отходов в составе автопоездов на полигоны.

Сфера работы с отходами сильнее всего зависит от системы транспорта, т. е. наиболее чувствительна к организации эффективной транспортной работы. Кроме того, транспортировка является сферой, в которой сокращение затрат связано не только с вопросами привлечения инвестиций и капиталовложениями. Эффективно организованная система транспортировки способна влиять на сокращение издержек без привлечения дополнительных инвестиций [2].

В разных уголках мира ситуация с системой работы с отходами обстоит по-разному, но нельзя сказать, что, хотя бы в одной стране система работает идеально. Реформа, провозглашенная в 2019 в России году, призвана зарегулировать эту сферу деятельности. Суть реформы заключается в нескольких основных положениях, а именно:

1) передача полномочий по организации системы обращения с твердыми коммунальными отходами на региональный уровень;

2) выделение услуги по вывозу и сортировке мусора из числа коммунальных;

3) изменение схемы обращения с отходами;

4) обязательное привлечение единого регионального оператора в качестве исполнителя;

5) изменение схемы формирования платежей за вывоз и сортировку отходов [3, 6].

В условиях работы с институтом регионального оператора предприятия связанные с системой работы с отходами особенно остро нуждаются в построении эффективной системы работы и минимизации своих затрат. Кроме того, особое внимание уделяется измерительным системам контроля за процессом работы с отходами на всех уровнях.

Задача регионального оператора и транспортных компаний не только построить территориальную схему тяготения потоков отходов к полигонам и конечным точкам жизненного цикла коммунальных отходов, но грамотно распределить потоки на микроуровне по станциям перегруза, обеспечивая контроль движения потоков с помощью информационно-измерительных систем.

Структура процесса

Система работы с отходами с точки зрения технологического процесса является совокупностью подсистем: образования (возникновение, накопление и сбор отходов), обработки (сортировка, предварительная подготовка, прессование, очищение и т. д.), утилизации отходов (захоронения, вторичного использования или сжигания), а также связывающей эти системы – системы транспортировки (рис. 1).

Рис. 2. Мусоровоз с бункером NTM [4]

Для сбора и транспортировки отходов во всем мире используются мусоровозы в бункерными прессующими установками (пример – рис. 2), которые позволяют осуществлять сбор из контейнеров и накопителей разного вида, и уплотняют отходы с помощью пресса. Современные бункеры имеют коэффициент прессования до 6 при объеме бункера более 20 м^3.

Технологически процесс работы мусоровоза можно выразить в следующих базовых рабочих циклах (рис. 3).

При изменении и оптимизации территориальных схем тяготения потоков отходов внутри города, маршруты сбора отходов (В) можно рассматривать статически неизменными, ввиду того что они формируются по коммерческим причинам, не связанным с территориальной схемой тяготения ТКО. Логистическая оптимизация цикла сбора отходов возможна и необходима, но является отдельной задачей. Площадки стоянки автотранспорта также останутся неизменными что делает плечо движения от базы до места сбора (А) статически неизменным [4].

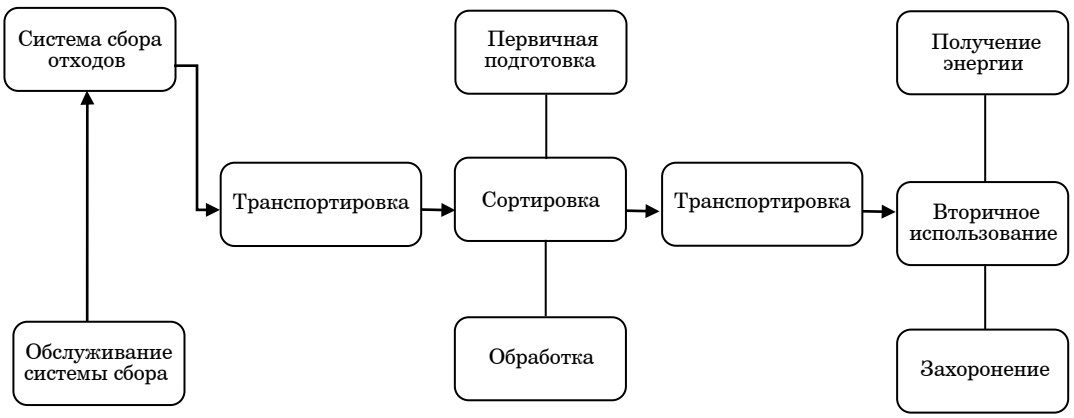


Рис. 1. Технологический процесс работы с отходами

Рис. 3. Технологическая схема работы мусоровоза на первой ступени: A – движение от базы к месту сбора отходов; $B_{1,2}$ – работа в режиме сбора; $C_{1,2}$ – движение на станцию перегруза; $D_{1,2}$ – разгрузка; F_1 – движение со станции перегруза к месту сбора; E – движение на базу после последней разгрузки; t – время работы мусоровоза на линии; n – количество циклов разгрузки в рамках работы на линии

Таким образом, при расчете наиболее эффективной территориальной схемы тяготения отходов к станции перегруза, влияние оказывают циклы движения на станцию перегруза и с нее к месту сбора (*C* и *F*), а также плечо возвращения на базу в конце выполнения маршрута (*F*). Эти циклы напрямую зависят от схемы тяготения потоков вывоза отходов.

В модели рассматривается схема n разгрузок на маршруте, потому как на сегодняшний день, мусоровозы в крупных городах за маршрут совершают от 2 до 4 разгрузок за рабочую смену.

При решении задачи оптимизации должны быть рассмотрены совокупности городских маршрутов. В модель должны быть заложены ограничения в виде, мощности перегрузов, тарифов на обработку, времени обслуживания мусоровоза на перегрузе и т. д. Рациональнее всего формулировать задачу в категориях методов оптимизации сложных систем. Данную модель от классической транспортной задачи отличает необходимость совершения нескольких разгрузок на одном маршруте и необходимость возвращения на базу в конце рабочей смены, однако эти изменения можно учесть.

Вышеописанное предполагает получение безупречно корректных исходных данных о работе системы на микроуровне для оптимизации моделей, что является одной из основных проблем при анализе системы. Сложности учета накопления, транспортировки и разделения потоков вывоза вызывают искажение в расчетных моделях системы. С целью получения корректных исходных данных, а также контролем за системой работы с отходами есть объективная необходимость в использовании информационно-измерительных систем контроля за вывозом отходов.

Вопрос получения объективной информации на микроуровне является принципиальным для работы с такими системами. Существует множество различных информационно-измерительных систем, предлагающих различные решения для работы с отходами, с принципиально разными подходами к получению данных, однако они до сих пор не получили массового распространения. Для того, чтобы оценить причины их невостребованности необходимо проанализировать основные типовые измерительные системы, и ввести их классификацию.

Измерительные системы в области работы с отходами

Существующие измерительные системы можно классифицировать по принадлежности к подсистеме работы с отходами. Классификация существующих измерительных систем представлена на рис. 4.

Основные методы и направления измерительный систем в сфере работы с отходами позволяют производить контроль на следующих участках технологического процесса:

1. Контроль накопления отходов. Различных автоматизированных систем контроля накопления твердых бытовых и коммунальных отходов на рынке довольно много. Принцип работы и метод формирования данных у всех похож. Типовой датчик наполненности контейнера представлен на рис. 5.

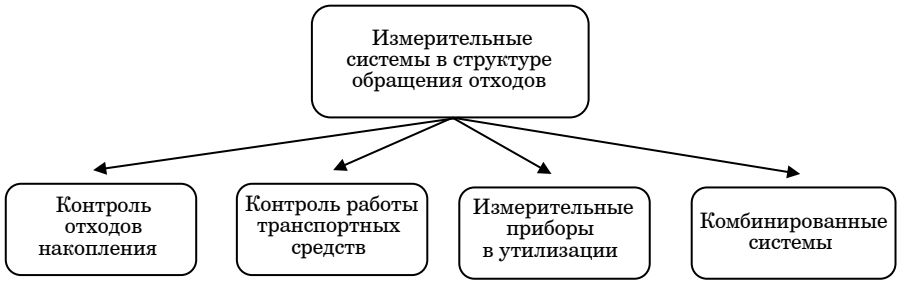


Рис. 4. Классификация измерительных систем в области работы с отходами

Рис. 5. Типовые датчики наполняемости контейнера

Рис. 7. Автоматизированные весовые комплексы

За очевидными достоинствами контроля наполненности контейнеров измерительными системами такого типа кроются довольно существенные недостатки: высокая стоимость в пересчете на единицу накопления, низкий уровень точности измерений, связанный высокой вероятностью ложного перекрытия инфракрасного или ультразвукового луча, ограниченный срок службы, низкая вандалоустойчивость, серьезные требованию к профилактическому обслуживанию и отсутствие формирования количественных показателей наполняемости [1].

Вышесказанное делает такого рода технологию низкоэффективной и возможной к реализации только на очень ограниченном участке под постоянным контролем.

2. Контроль рабты мусоровозов. Системы контроля передвижения в XXI веке получили широкое распространение на транспортных предприятиях, в том числе и связанных с работой с отходами. Поскольку перемещение мусоровозов потенциально связано с контролем за нелегальными разгрузками, в России контроль трека перемещения мусоровоза стал законодательно обязателен [5].

3. Комбинированные системы. Поскольку система транспортировки отходов является основной артерией перемещения грузопотоков в области работы с отходами, потенциально размещение оборудования на мусоровозах является правильным решением. С целью получения объективной информации ряд производителей попытались создать системные решения на базе автомобилей, которые затрагивали бы систему накопления отходов (рис. 6).

Программные комплексы такого типа представляют интерес, однако предоставляемые ими показатели чаще являются автономные независимыми системами, немеют возможности включения их в существующий бизнес процесс, а также нестабильны.

Существуют телематические информационно-измерительные системы, учитывающие нагрузку мусоровоза на ось, что позволяет оценивать также массу перевозимых отходов [7]. Такой подход потенциально более надежный для получения исходных данных, однако на сегодняшний день такие системы используются редко, ввиду высокой стоимости оборудования и низкой надежности.

4. Системы весового контроля. На сегодняшний день в системе работы с отходами поток контролируется с помощью систем взвешивания – весовых комплексов (предполагающих контроль веса проходящих через них мусоровозов, рис. 7).

Проблемы существующих информационно-измерительных систем

В результате анализа существующих измерительных систем становится видна основная проблема системы работы с отходами. Совокупность измерительных систем в технологическом процессе (рис. 8) наглядно демонстрируют системную ошибку в подходе.

Рис. 6. Оборудование системы Binman

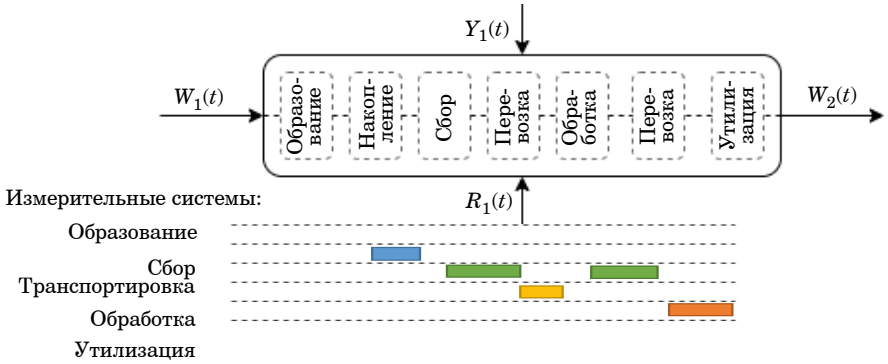


Рис. 8. Совокупность измерительных систем в технологическом процессе работы с отходами [1]

Элементы процесса и измерительные системы работают исключительно отдельно друг от друга в разных блоках технологического процесса, не взаимодействуя друг с другом и не учитывая информацию, полученную на других участках технологического процесса.

В системе вывоза твердых коммунальных отходов присутствуют разрозненные технические системы: аппаратная, транспортная, технологическая, организационно-управленческая которые необходимо учитывать при разработке единой транспортной модели. Сегодня имеет место разрыв в процессе передачи информации между данными системами, что приводит к ошибкам и невозможности качественной модернизации системы. Из-за разрозненности становится невозможно применять оптимизационные модели на макроуровне.

Для решения описанной проблемы необходимо изменить принципиальный подход к описанию и реализации технологического процесса работы с отходами. Основной задачей можно считать переход от разделенных обособленных элементов процесса к комплексному единому подходу в работе с системой. Разработка связанной, взаимодополняющей системы измерительной аппаратуры позволит контролировать процессы, протекающие в системе и влиять на них не в рамках одного элемента на всю систему.

Применение информационно-измерительных систем, поможет предприятиям контролировать процесс вывоза отходов на макроуровне, а также позволит применять современные методы анализа, и оптимизации производственных и бизнес процессов. В рамках реформы обращения с отходами и разработки территориальных схем накопления отходов такие, инструменты становятся необходимыми.

На сегодняшний день существует необходимость в разработке принципиально новых подходов к информационно-измерительным системам в ключевых участках технологического процесса, а именно в области сбора и утилизации отходов. Такие системы должны отвечать критериям гибкости, точности и возможности включения в существующие бизнес процессы.

Библиографический список

1. *Рубинов В. В.* Проблемы современного подхода к технологическому процессу обращения с отходами // Материалы конференции: 2021 Волновая электроника и ее применение в информационно-телекоммуникационных системах (WECONF). IEEE. 31 мая 2021.

2. *Рубинов В. В.* Оценка динамики образования отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика. Вып. № 3 (25), ISSN 2007-5687. СПб.: ГУАП. 2020. С. 3–8. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-3-8.

3. Федеральный закон Российской Федерации № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», 22 мая 1998 г. № 2491-II, в редакции от 18 декабря 2006 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109 (дата обращения: 02.12.2022).

4. *Рубинов В. В., Фетисов В. А.* Разработка модели оптимизации потоков ТКО на уровне маршрутов // Системный анализ и логистика. Вып. № 4(30), ISSN 2007-5687. СПб.: ГУАП. 2021. С. 68–75. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-68-75.

5. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2008 г. № 641 «Об оснащении транспорта, технических средств и комплексов средствами спутниковой навигации ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS» (с изменениями и дополнениями).

6. *Глеб О. В., Чудакова К. А.* Раздельный сбор отходов в России: проблемы и решения // Аграрное и земельное право. 2020. № 2. С. 56–59.

7. Оборудование для спутникового мониторинга. URL: https://ssm22.ru/s-1-yanvarya-2018-goda-musorovozy-obyazany-ispolzovat-oborudovanie-dlya-sputnikovogo-monitoringa. (дата обращения: 02.12.2022).

УДК 656.025.4

Т. Р. Сигина*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ИММУНОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КАЛИНИНГРАД

В статье рассматривается вопрос организации перевозки иммунобиологических лекарственных препаратов из Санкт-Петербурга в Калининград. Проводится подробный анализ специализированного подвижного состава и необходимых условий для транспортировки на воздушном, железнодорожном, морском и автомобильном транспорте скоропортящихся иммунобиологических лекарственных препаратов. Оптимальный вариант транспортировки определяется на основании сравнения коммерческих показателей по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *иммунобиологические препараты, организация перевозки, технология транспортировки, виды транспорта, транспортный пакет, сроки перевозки, провозные платежи, упаковка.*

T. R. Sigina*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF IMMUNOBIOLOGICAL DRUGS FROM ST. PETERSBURG TO KALININGRAD

The article deals with the issue of organizing the transportation of immunobiological drugs from St. Petersburg to Kaliningrad. A detailed analysis of specialized rolling stock and conditions necessary for perishable immunobiological drugs for transportation by air, rail, sea and road transport is carried out. The optimal transportation option is determined based on a comparison of commercial work on transportation routes.
Keywords: *immunobiological preparations, transportation organization, transportation technology, types of transport, transport package, terms of transportation, freight charges, packaging.*

Введение

Вакцинация обозначена как одна из ценностей в части профилактики болезней и формирования здорового образа жизни.

Иммунобиологические лекарственные препараты (ИБЛП) – препараты, предназначенные для формирования активного или пассивного иммунитета, либо диагностики наличия иммунитета или диагностики специфического приобретенного изменения иммунологического ответа на аллергизирующие вещества. К иммунобиологическим лекарственным препаратам относятся вакцины, анатоксины, токсины, сыворотки, иммуноглобулины.

Рынок иммунобиологических препаратов на сегодня – один из самых быстрорастущих в фарминдустрии. В этой связи становятся особенно важными вопросы перевозки иммунобиологических препаратов.

Обоснование вида транспорта и подвижного состава

Иммунобиологические препараты относят к скоропортящимся грузам. При транспортировке ИБЛП требуется соблюдение влажностного и температурного режимов, санитарно-гигиенических норм, сроков доставки, перевозки в специализированном подвижном составе [1]. Следовательно, требования по соблюдению температурного режима обязаны неукоснительно быть выполнены всеми участниками логистической цепи поставок: предприятием-произво-

дителем, транспортной компанией, дистрибьютором, аптеками, медицинскими организациями. (4 уровня холодовой цепи).

В статье рассматривается организация транспортировки иммунобиологических препаратов из Санкт-Петербурга до Калининграда четырьмя маршрутами:

1. перевозка железнодорожным транспортом;
2. перевозка автомобильным транспортом;
3. перевозка воздушным транспортом;
4. смешанная перевозка морским и железнодорожным транспортом.

При транспортировке ИБЛП по маршруту железнодорожным транспортом и смешанной перевозке целесообразно использовать вагоны рефрижераторы, так как груз скоропортящийся. Из-за того, что груз достаточно легкий и грузоподъемность вагона намного превышает общий вес груза в вагоне, необходимо выбирать вагоны с наибольшим объемом кузова, т. е. максимальной грузовместимостью. Перевозка осуществляется в рефрижераторном вагоне модели 16-5213 (рис. 1). Его основные характеристики приведены в табл. 1.

При смешанной перевозке транспортировка груза будет осуществляться железнодорожным транспортом 145 км от Санкт-Петербурга до станции Лужская Октябрьской ж/д. (порт Усть-Луга). Далее паромной перевозкой 465 морских миль из морского порта Усть-Луга до морского порта Балтийск. Перевозка морским транспортом осуществляется на пароме в 2 вагонах-рефрижераторах. Так как паром является железнодорожным, то перегрузка не понадобится. От Балтийска до Калининграда 47 км транспортировка снова будет осуществляться железнодорожным транспортом. По маршруту порт Усть-Луга – порт Балтийск курсируют паромы «Балтийск» и «Амбал». Оба являются грузопассажирскими. Третий паром «Маршал Рокоссовский» начал курсировать в марте 2022 г. (рис. 2).

Рис. 1. Рефрижераторный вагон модели 16-5213

Транспортировка автомобильным транспортом выбираем автомобильный трехосный полуприцеп-рефрижератор Schmitz (рис. 3) с соответствующими техническими характеристиками (табл. 3) [2].

Грузовые авиаперевозки в Калининград из Санкт-Петербурга – это надежный и быстрый способ доставить груз по воздуху «в обход всех границ» и без таможенного оформления документов. Перевозку авиатранспортом будем осу-

Таблица 1

Основные характеристики рефрижераторного вагона 16-5213

Модель	Габарит	Грузоподъемность, т	Объем, м^3	Внутренние размеры кузова (В/Ш/Д), мм	Начало выпуска, год
16-5213	1-Т	55,0	126,0	2580/2690/19320	2020

Таблица 2

Основные характеристики паромов

Показатели	Паром «Балтийск»	Паром «Амбал»	Паром «Маршал Рокоссовский»
Тип	железнодорожный паром	железнодорожный паром	железнодорожный паром
Длина, м	187,36	187,36	199,9
Ширина, м	21,60	21,60	27
Осадка, м	6,5	6,5	6
Мощность, кВт	16000	16000	2×6000
Скорость хода, узлов	17 (31,5 км/ч)	17 (31,5 км/ч)	16,5
Вместимость ж/д. вагонов, ед.	85	105	80 цистерн, 54 полувагона или 36 грузовых вагона

Рис. 2. Паром «Маршал Рокоссовский»

Рис. 3. Автомобильный трехосный полуприцеп-рефрижератор Schmitz

ществлять чартерным рейсом воздушным грузовым судномАн-124-100 «Руслан» (рис. 4) с техническими характеристиками, показанными в табл. 4.

Для укрупнения грузовых мест и для сохранной перевозки препаратов, коробки с ИБЛП помещают в авиаконтейнер. В данном случае использовался грузовой авиационный контейнер LD-9 рефрижератор (рис. 5) по классу ИАТА – RAP охлаждающий контейнер на основе P1P, табл. 5.

Транспортная маркировка груза

Маркировка потребительской упаковки выполняется с указанием:

1. На первичной упаковке на русском языке – наименование препарата (международное непатентованное, или группировочное, либо химическое, либо торговое наименование), номер серии, дата выпуска, срок годности, дозировка или концентрация, объем, активность в единицах действия или количество доз.

2. На вторичной (потребительской) упаковке хорошо читаемым шрифтом на русском языке – наименование лекарственного препарата, наименование производителя лекарственного препарата, номер серии, дата выпуска, номер регистрационного удостоверения, срок годности, способ применения, дозировка или концентрация, объем, активность в единицах действия либо количество доз в упаковке, лекарственная форма, условия отпуска, условия хранения, предупредительные надписи.

3. Внутрь каждого ящика вкладывают инструкцию по применению вакцины, контрольный лист с указанием наименования вакцины, ее количество в ящике, номера серии, даты упаковки и фамилии упаковщика.

4. Транспортная маркировка тары выполняется по ГОСТ 14192–96 [3] с нанесением манипуляционных знаков: «Скоропортящийся груз» и «Ограничение температуры», «Беречь от солнечных лучей (от нагрева)», «Беречь от влаги», «Хрупкое. Осторожно», «Верх».

Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального варианта транспортировки ИБЛП необходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки. На рис. 6 показаны графические изображения маршрутов.

Описание маршрута № 1 (железнодорожным транспортом).

Расстояние между Санкт-Петербургом и Калининградом по железной дороге составляет 1465 км [4]. Маршрут проходит через железные дороги: Октябрьская (до Езерище), Белорусская

Рис. 4. Ан-124-100 «Руслан»

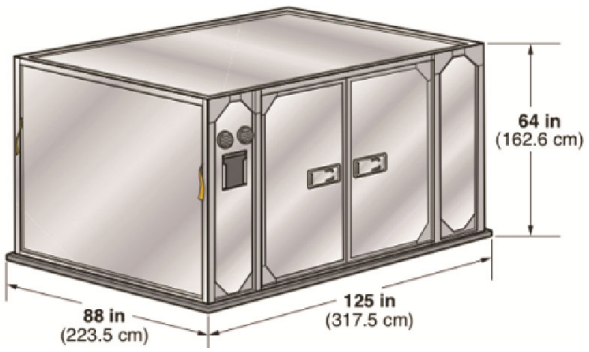


Рис. 5. Грузовой авиационный контейнер LD-9 Рефрижератор

Таблица 3

Технические характеристики рефрижератора

Характеристика	Значение
Внешняя длина кузова (LA), мм	13 600
Внутренняя длина кузова (L), мм	13 410
Полезная длина кузова, мм	13 315
Внутренняя ширина кузова (B), мм	2 460
Внутренняя высота (LH), мм	2 650
Полезная высота кузова (LN), мм	2 650
Общая высота в порожнем состоянии (HA), мм	4 008
Высота погрузки сзади в порожнем состоянии (H), мм	1 273
Шины, 4 шт.	385/65 R 22.5''
Полная масса (допустимая), кг	39 000
Полезная нагрузка (допустимая), кг	31 040
Нагрузка на ось (допустимая), кг	27 000
Нагрузка на седло, кг	15 000
Порожная масса в сборе, кг	7 960
Высота седла в порожнем состоянии (S), мм	1 141
Высота седла в нагруженном состоянии (S), мм	1 115
Ширина кузова (BA), мм	2 600
Колесная база (R), мм	7 600
Высота поемка задней двери, мм	2 640
Ширина проема задней двери, мм	2 460
Расстояние между осями (W), мм	1310
Передний вес (F), мм	1600

Таблица 4

Характеристики Ан-124-100 «Руслан»

Геометрические и массовые характеристики		
Длина самолета, м	69,1	
Размах крыла, м	73,3	
Площадь крыла, м^2	628,5	
Стреловидность крыла по передней кромке	35-32	
Высота, м	21,08	
Габариты грузовой кабины, м	4,4×6,4×36,5	
Длина грузовой кабины с рампами, м	43,7	
Объем салона, м^3	1027,8	
Масса взлетная максимальная, кг	392000 (405)	
Масса пустого снаряженного, кг	172000	
Максимальная коммерческая нагрузка, кг	120000 (150000)	
Запас топлива, л	230000	
Геометрические и массовые характеристики		
Топливная эффективность, г/т км	145	
Летные данные		
Скорость полета, км/ч	крейсерская	750–850
	максимальная	865
Крейсерская высота полета, м		9100–11100
Потолок, м		12100
Дальность полета, км	максимальная	15700
	с грузом 40 т	12000
	с грузом 120 т	4800
Длина разбега при взлетной массе, м	нормальной	2520
	максимальной	3000
Длина пробега при максимальной посадочной массе, м		900
Потребная длина ВПП, м.		3000

Таблица 5

Характеристика грузового авиационного контейнера LD-9

№ п/п	Параметр	Описание
1	Код ATA	LD-9 рефрижератор
2	Класс IATA	Тип 5
3	Описание	Изолированный авиаконтейнер с жесткой дверью
4	Дверь	2,16 м×1,47 м
5	Масса тары	400 кг
6	Максимальный вес	6,0 т
7	Типы ВС	747, 767,777,787, DC-10, MD-11 нижняя палуба
8	Размеры, м – длина – ширина – высота	 –3,175 –2,235 –1,626

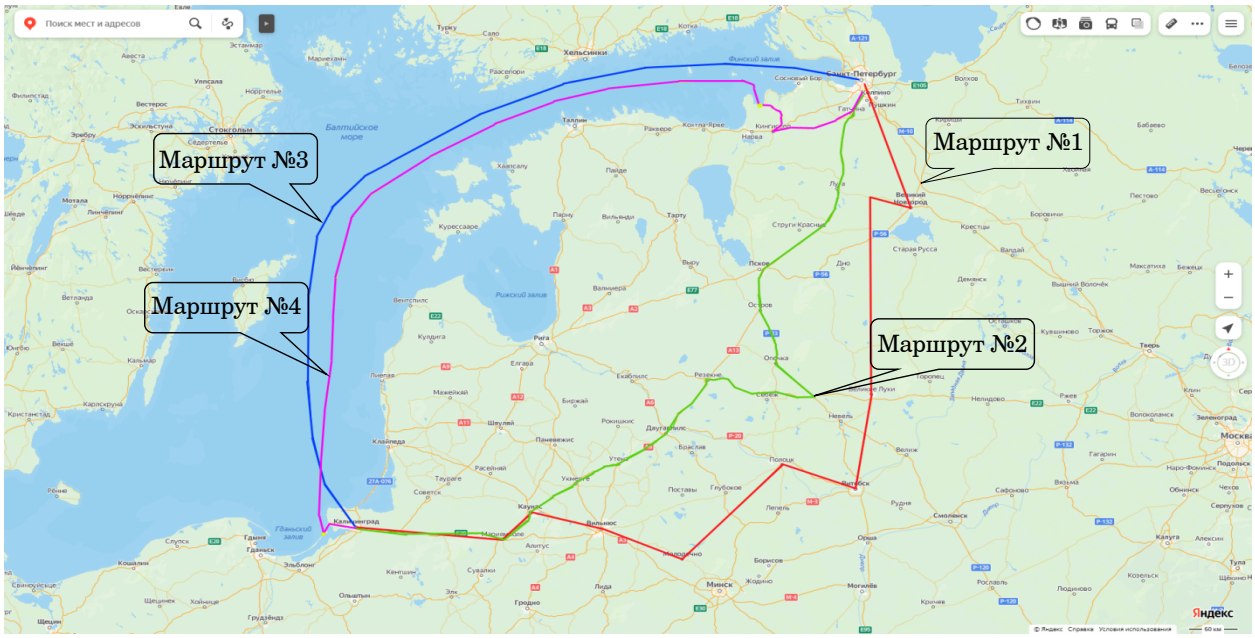


Рис. 6. Графическое изображение маршрутов

(до Кяна), Литовская (до Чернышевского) и Калининградская. Перевозка осуществляется в рефрижераторных вагонах модели 16-5213.

Описание маршрута № 2 (автомобильным транспортом).

Маршрут проходит через автомобильные дороги: Федеральная трасса А-118 (Пулковское шоссе), затем Р-23, которая начинается в Санкт-Петербурге и проходит через Псков – Пустошка – Невель – граница с Республикой Беларусь. Далее по автомобильной дороге республиканского значения Р-45 в Белоруссии, соединяющей город Полоцк и границу с Литовской Республикой (Котловка). Далее маршрут проходит по автомагистрали в Литве А7, соединяющую Мариямполе и границу с Россией (Калининградская область) недалеко от Кибартай. Оттуда дорога продолжается в Калининград. Общее расстояние из Санкт-Петербурга в Калининград составляет 1 103 км [5]. Для транспортировки используется автомобильный трехосный полуприцеп-рефрижератор Schmitz.

Описание маршрута № 3 (воздушным транспортом).

Пунктом отправки груза является аэропорт г. Санкт-Петербург «Пулково», а пунктом назначения аэропорт г. Калининград «Храброво». Воздушные трассы теперь проходят над нейтральными водами Балтики. Хоть Литва вместе с Латвией и Эстонией закрыли свое воздушное пространство для российских самолетов, калининградский аэропорт работает в штатном режиме.

Таблица 6

Сравнительная таблица перевозки разными видами транспорта

Маршрут	Количество ПС и его вид	Протяженность маршрута, км	Время доставки, сут	Стоимость, руб.
№ 1 ж/д	2 вагона-рефрижератора	1465	4	570596
№ 2 авто	3 полуприцепа-рефрижератора	1103	5	260835
№ 3 авиа	1 Ан-124-100 «Руслан»	827	1	4100171
№ 4 ж/д + морской	2 вагона-рефрижератора	192 км ж/д 465 км (862км)	4	370861

Время в пути увеличилось, но на транспортной доступности региона запреты не отразились.

Расстояние между Санкт-Петербургом и Калининградом по воздуху составляет 827 км. Перевозку авиатранспортом будем осуществлять чартерным рейсом воздушным грузовым судномАн-124-100 «Руслан» с использованием грузовых авиационных контейнеров LD-9 рефрижератор.

Описание маршрута № 4 (железнодорожный + морской транспорт).

Транспортировка груза будет осуществляться железнодорожным транспортом 145 км от Санкт-Петербурга до станции Лужская Октябрьской ж/д (порт Усть-Луга). Порт Усть-Луга расположен на южном берегу Финского залива. Далее маршрут будет проходить морем – паромной линией между портами Усть-Луга и Балтийск. Морское расстояние Усть-Луга – Балтийск составляет 465 морских миль (примерно 862 км) [6]. Стандартная продолжительность морского рейса составляет около 40 часов. Порт Балтийск расположен на юго-восточном берегу Балтийского моря в 47 км от Калининграда. От Балтийска до Калининграда транспортировка снова будет осуществляться железнодорожным транспортом в рефрижераторных вагонах модели 16-5213. Так как паром является железнодорожным, то перегрузка не понадобится.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Результаты сравнения маршрутов по показателям стоимости и времени доставки представлены в табл. 6 на основании расчетов по схемам Прейскуранта №10-01 [7], Соглашения «Об общих принципах регулирования цены при организации работ на железнодорожных станциях Лужская и Балтийск и железнодорожно-паромных комплексах в портах Усть-Луга и Балтийск и стоимости перевозки паромом на линии Усть-Луга – Балтийск» [8], тарифного руководства [9], Правил исчисления сроков доставки грузов [10], а также согласно методике приблизительной оценки стоимости перевозки грузов воздушным транспортом [11].

Расчеты стоимости и времени доставки груза показали, что самым быстрым, но и самым дорогим является воздушный транспорт. Если грузополучателю необходимо в кратчайшие сроки доставить груз, и при этом стоимость не имеет значения, то оптимальным вариантом будет являться перевозка по воздуху.

Автотранспорт проигрывает по количеству необходимого подвижного состава (авто – 3 ед., ж/д. – 2 ваг., авиа – 1 сам.), но выигрывает с экономической точки зрения. Но, учитывая трудности и задержки при пересечении границы с Литвой, это не самый рациональный вариант.

Заключение

В статье описываются иммунобиологические препараты, их транспортные характеристики, способы маркировки. Также выбран подвижной состав на воздушном, железнодорожном, автомобильном и морском транспорте и представлены маршруты транспортировки, рассчитаны стоимости перевозок и временные интервалы перевозок по 4 маршрутам.

На основании этих расчетов был сделан следующий вывод:

Паромная переправа «Балтийск – Усть-Луга» – единственная транспортная артерия, связывающая Калининградскую область с основной территорией России в обход территорий других государств. Таможенное оформление в порту Усть-Луга не производится – перевозка осуществляется как из России в Россию. Поэтому мультимодальная перевозка (ж/д. + морской паром) в сегодняшних меняющихся экономических условиях – самый оптимальный путь доставки товара.

Библиографический список

1. СанПин 3.3686-21 Раздел XLVIII Условия транспортирования и хранения иммунобиологических препаратов.

2. Правила перевозок грузов автомобильным транспортом, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2020 года № 2200.

3. ГОСТ 14192-96 Межгосударственный стандарт «Маркировка грузов».

4. Расчет расстояний РЖД. URL: https://cargolk.rzd.ru/services/calculator (дата обращения: 19.05.2022).

5. Биржа грузовых перевозок АТИ. URL: https://trace.ati.su/?Cities=1_1-2_1050&WithinCountry=0 (дата обращения: 19.05.2022).

6. Онлайн-калькулятор расстояний. URL: https://www.searates.com/ru/services/distances-time/ (дата обращения: 19.05.2022).

7. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Ч. 1, 2. М.: ПФ «Красный Пролетарий», 2003. (с изменениями на 31 января 2017 года).

8. Соглашение «Об общих принципах регулирования цены при организации работ на железнодорожных станциях Лужская и Балтийск и железнодорожно-паромных комплексах в портах Усть-Луга и Балтийск и стоимости перевозки паромом на линии Усть-Луга – Балтийск» от 13.08.2010 № 882.

9. Тарифное руководство № 4 (ред. от 25.01.2016) Книга 1. Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог (утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества).

10. Приказ Министерства транспорта РФ от 07.08.2015 № 245 «Об утверждении Правил исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом».

11. Методика расчета себестоимости авиаперевозок. URL: https://studfile.net/preview/6154463/page:9/ (дата обращения: 20.05.2022).

УДК 656.2

Н. А. Слободчиков*
кандидат военных наук, профессор
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОТПРАВОК ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ

Мировая практика организации перевозок грузов в современных условиях показывает, что без автоматизации и цифровизации своей деятельности транспорт не может успешно работать. Предоставление качественной услуги невозможно без эффективного взаимодействия всех участников перевозочной деятельности, которая достигается на сегодняшний день при помощи цифровых технологий. При этом планирование перевозок, как показывает практика, должно быть более клиентоориентировано. Так, например, в настоящее время ОАО «РЖД» проводит эксперимент по планированию суточной погрузки с участием всех субъектов перевозочного процесса (перевозчика и владельца инфраструктуры в лице ОАО «РЖД», грузоотправителя и грузополучателя), с применением таких информационных комплексов, как системы ДИЛС и СКПП (суточный клиентский план погрузки).
Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, логистика, морской транспорт, планирование перевозочного процесса, информационные технологии, транспортное обслуживание.*

N. A. Slobodchikov*
PhD, Military, Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROBLEMS OF IMPROVING THE SYSTEM OF OPERATIONAL PLANNING OF CARGO SHIPMENTS BY RAIL

The world practice of organizing cargo transportation in modern conditions shows that without automation and digitalization of its activities, transport cannot work successfully. Since, theredeployment of a quality service is impossible without the effective interaction of all participants in transportation activities, which is achieved today with the help of digital technologies. At the same time, the planning of transportation for today, as practice shows, should be more customer-oriented. For example, at present, «Russian Railways» is conducting an experiment on planning for loading with the participation of all subjects of the transportation process (the carrier and the owner of the infrastructure represented by JSC «Russian Railways», shippers and consignees), with the use of such information systems as DILS and CRYPT (daily client loading plan).
Keywords: *railway transport, logistics, sea transport, planning of the transportation process, information technologies, transport services.*

Особенности настоящего этапа организации грузо- и вагонопотоков в Российской Федерации связаны с тем, что с февраля 2022 года произошел разворот основных потоков массовых, контейнерных грузов с направления на порты и из портов, расположенных на Северо-Западе нашей страны, в направление на порты, расположенные в восточной части. За последние годы объемы перевозок в порты по железнодорожным дорогам постоянно возрастают. Причем с февраля 2022 года направления потоков перевозок претерпела существенное изменение, произошел поворот основных потоков массовых грузов с северо-западных портов сраны на восточные и южные порты.

В Российской Федерации основной особенностью работы морских портов является то, что основной грузооборот сосредоточен в 44 морских портах из 62-х портов. Поэтому проблема взаимодействия железнодорожного транспорта и портов вообще и в части планирования перевозок, в частности, на современном этапе стоит очень остро. В настоящее время для качественного планирование подвода грузов в порты ОАО «РЖД» и порожнего подвижного состава, для вывоза грузов из них, использует такие информационные комплексы как, ДИЛС и СКПП (суточный клиентский план погрузки). Их использование в целом, помогает более рационально использовать имеющиеся пропускную и

провозную способность сети железных дорог и сократить количество отставленных (брошенных) от движения поездов.

В то же время, данные комплексы требуют существенной доработки, для этого в мае 2022 года рабочей группой ОАО «РЖД» был проведен аудит процессов типовой «Технологии коммерческой диспетчеризации с использованием СКПП», с целью моделирование ее состояния по типу «Как должно быть» для подразделений линейного и регионального уровня управления.

Проведенный анализ выполнения клиентского плана на железной дороге выявил разбалансировку интересов участников перевозочного процесса, мешающую качественно спланировать и организовать эксплуатационную работу подразделений ОАО РЖД и клиентов.

В ходе проведенного аудита было выявлено, что основными причинами отклонение фактической погрузки от согласованного плана в СКПП в настоящее время относятся:

– прием груза к перевозке, ранее не заявлявшегося из-за несвоевременной оплаты от заказчиков щебеночной продукции в рамках тендерных поставок;

– прием морскими терминалами дополнительных объемов грузов на основании информации о судозаходах;

– увеличение длины формируемых отправительских маршрутов исходя из объемов наработанной в течение смены продукции;

– завышение грузоотправителями СКПП при отсутствии грузовой базы, в т.ч. не подвоз груза на контейнерные терминалы.

Проведенная группой работа позволила в III квартале систематизировать порядок взаимодействия ОАО РЖД с клиентами, что привело к улучшению, за четыре месяца, точность планирования общей погрузки от заявленной в СКПП, почти на половину (46,4%), а в разрезе припортовых дорог назначения – в три раза по отношению к маю 2022 года.

В проведенной корректировке системы суточного планирования особое внимание было уделено логистическим аспектам состыковки объемов отгрузки по дорогам и станциям назначения, с их техническими возможностями освоить эти объемы перевозок. Если в мае допускались многократные факты отклонения погрузки от согласованного СКПП более чем в 100 вагонов по дорогам назначения, то к сентябрю по этому критерию удалось трехкратно улучшить точность планирования. Анализ использования суточного клиентского плана представлен на рис. 1.

Связи с изменением с февраля 2022 года направления перевозок, с преобладанием восточного направления, сложилась ситуация, когда, потребность в объемах перевозок превышают пропускные способности дорог по ряду направлений, особенно на дороги Восточного полигона. Поэтому, при формировании СКПП с клиентами проводится работа по переориентированию отгрузок на направления, имеющие резервы пропускных способностей. Особенно это стало важно, в работе ОАО РЖД с клиентами, при планировании отгрузок назначением на припортовые терминалы.

На сегодняшний день в СКПП при планировании отправлений на лимитирующие направления (железнодорожные направления имеющие лимитирующие пропускные способности) предусмотрены такие ограничения, как:

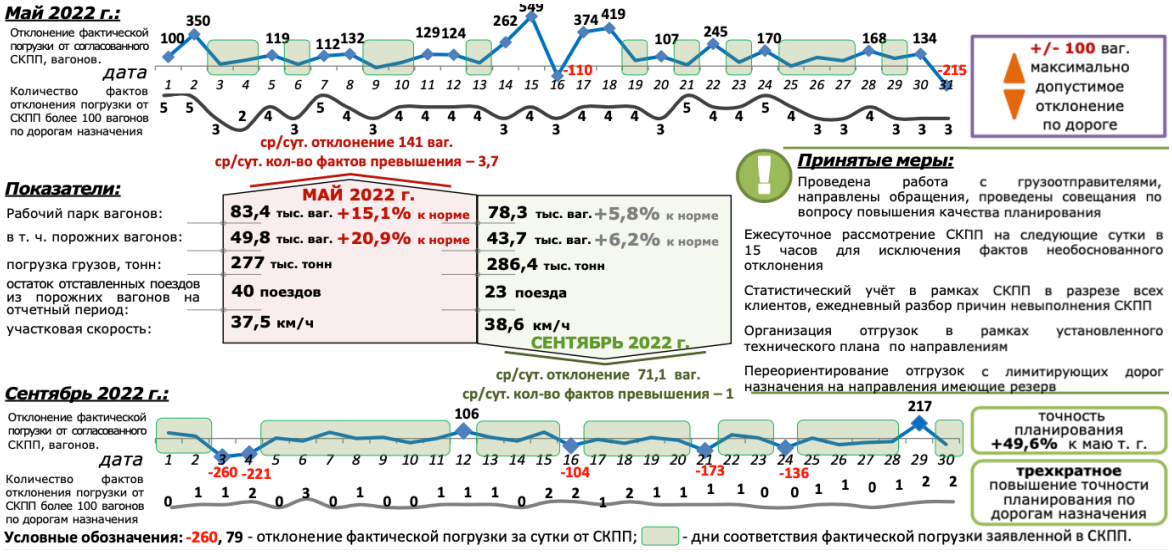


Рис. 1. Анализ использования суточного клиентского плана погрузки

Рис. 2. Реализация ограничительных функций технологии СКПП

– распределение объема погрузки (по всем клиентам) не выше параметров, доведенных до дорог отправления ТЦФТО и ДЛЦ дорогами назначения;

– установлены запреты на изменение СКПП в сторону увеличение;

– только в исключительных случаях разрешается погрузка с отклонением от утвержденного СКПП, при чем для этого необходимо получить согласование с ЦД и ЦФТО.

Такие ограничения призваны обеспечивать погрузку и продвижение груза с учетом пропускной способности железнодорожной инфраструктуры и перерабатывающих возможностей морских и других терминалов. Однако технически эти требования в автоматизированных системах никак не реализованы и контроля их соблюдения нет.

Поэтому, в настоящее время назрела необходимость, внести изменения в действующую технологию планирования в части определения критерия исключительных случаев погрузки на лимитирующие направления с отклонением от СКПП и реализации логического контроля этой функции в информационных системах. Предлагаемый принцип реализация ограничительных функций представлен на рис. 2.

Однако, чтобы внедрить эти ограничения необходимо, прежде всего, необходимо законодательно перевести систему суточного планирования по технологии «клиентского плана» из экспериментального в основной инструментом планирования погрузки.

Кроме того, необходимо утвердить принцип, равнозначной ответственности между РЖД и клиентом, для этого, целесообразно ввести в Правила перевозок грузов термин «клиентский план погрузки». В то же время, целесообразно реализовать следующие предложения по изменению технологий СКПП:

1. Необходимо предусмотреть возможность, для отправителя, в случае несогласования объемов СКПП со стороны перевозчика, перенести объемы погрузки по СКПП на следующие сутки.

2. Предоставить возможность планирования перевозок с использованием СКПП грузоотправителям железнодорожных администраций сопредельных государств (КЗХ, БЕЛ и т. д.) в адрес портов Северо-Запада и на другие лимитирующие направления.

3. На сегодняшний день возникла необходимость предусмотреть возможность добавления в существующий классификатор причин отклонения от плана суточной погрузки, заявленного в СКПП ЭТРАН/АСУ МР, такие причины:

– неисправность погрузочно-разгрузочного оборудования;

– предъявляемая партия к перевозке, менее установленной по договору;

– отказ получателя от вагонов, прибывших в его адрес под погрузку;

– неприем груза к перевозке ввиду нарушения требований ТУ, НТУ, МТУ, правил перевозки наливных грузов и др.;

– отсутствие подтвержденных оплатой адресов сбыта продукции;

– занятость станционных путей для вывода заявленных к перевозке объемов, с путей необщего пользования;

– отсутствие подвоза груза, грузоотправителям, причастными экспедиторами;

– отсутствие возможности вывоза, погруженных вагонов в планируемые сутки;

– проведение ремонтно-путевых работ на инфраструктуре.

4. Кроме выше перечисленных, необходимо предусмотреть в модуле «Планирование погрузки на лимитирующие направления» в АС ЭТРАН возможность ввода, при необходимости, со стороны припортовой дороги назначения уточняющей информации об имеющихся затруднениях в приеме морскими терминалом определенных наименований грузов в рамках согласованных объемов от дорог отправления, а также других критически важных аспектов для организации отгрузок.

В тоже время, для дальнейшего улучшения процесса согласования заявок формы ГУ-12 в перспективных технологиях планирования погрузки через Динамическую модель загрузки инфраструктуры (далее – АС ДМЗИ) и СКПП необходимо использовать принципы «Методики расчета возможностей железнодорожной инфраструктуры для пропуска объемов перевозок груженых и порожних вагонов». Что бы выполнить эту функцию, необходимо за счет автоматизации обеспечить постоянную актуализацию входных данных, рассчитанных на основе этой «Методики».

Предлагаемые изменения помогут перейти от ручного режима управления к единой системе автоматизированного управления перевозочным процессом от начала планирования перевозки до ее завершения, с элементами корректировки и контроля. Возможный вариант такого использования системы представлен на рис. 3.

Вторым важнейшим элементом организации бесперебойного перевозочного процесса является качественное планирование подвода груза. На сегодняшний день, для достижения этого на Октябрьской дороге существует информационная логистическая система (ДИЛС). Данная система объединяет операторов морских торговых портов Усть-Луга и Мурманск, участвующие в проекте и ОАО РЖД. Существующий логистический центр, с ее помощью, планирует подвод поездов к этим портам с благодаря сформированного системой в автоматическом режиме плана подвода. Эта система, например, в значительной степени упорядочило работу станции Лужская, подходов к ней и портовых операторов.

Благодаря использованию автоматизированного плана подвода ДИЛС, работники логистического центра разрабатывают математическую модель подвода поездов на станцию Лужская, где на схеме дороги указывается дислокация поездов на ключевых станциях и участках. При этом учитывается дальность перевозки, темп продвижения и востребованность груза терминалами.

Данная модель является основой для планирования порядка продвижения поездов на сетевом уровне и дает работникам графическое представление о дислокации поездов, включенных в план подвода, облегчая тем самым процессы планирования на дорожном уровне.

В тоже время, использование данной модели позволило повысить точность планирования подвода поездов на станцию Лужская более чем на 4% (с 95,7% в мае до 99,8% в сентябре).

В этой связи, на основе полученного положительного опыта, предлагается распространить

Рис. 3. Формирование единого информационного поля системы планирования погрузки

данный процесс и эту модель на транзитные и припортовые дороги, при этом, предусмотрев возможность «он-лайн» информирование персонала ДЦУП о порядке продвижения поездов.

На основании вышеизложенного, можно сделать следующий вывод, на сегодняшний день, использование логистических и информационных технологий при организации перевозок грузов, является перспективным направлением оптимизации работы транспортной системы. С учетом того, что железные дороги и морские порты на протяжении многих лет ведут совместный поиск путей оптимизации перевозочного процесса, необходимо использовать полученный положительный опыт в информатизации перевозочного прогресса «от план до выгрузки». Ведь понятно, что чем выше загруженность пропускной и провозной способности железной дороги, тем больше цена ошибки при ручном формировании планов погрузки и подвода поездов в порты. Поэтому, несмотря на то, что действующие системы планирования перевозочного процесса являются эффективными инструментами, однако необходимо учитывая их сравнительно недавнего ввод в использование, и накопленный опыт их использования, необходимо повысить их функциональность и эффективность. При этом, основе повышения функционирования комплексов, в первую очередь, стоит рассмотреть возможность легализации предлагаемых процессов с точки зрения действующего Российского законодательства.

Библиографический список

1. *Чеботарева Е. А., Солоп И. А.* Развитие логистических и информационных технологий планирования доставки грузов в припортовой транспортно-технологической системе Юга России. РГУПС, 2019. С. 12.

2. Умный контейнер, умный порт – интернет вещей и блокчейн в цифровой системе мировой торговли / Ю. В. Куприяновская, А. А. Климов, А.Г. Арсенян. М.: Библиография, 2017. 36 с.

3. Глазков Михаил Олегович, заместитель генерального директора ОАО «РЖД», начальник Центральной дирекции управления движения. Современные подходы к преодолению вызовов, стоящих перед компанией: Открытая лекция для слушателей Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра. I (ПГУПС), ОАО «РЖД». Ноябрь 2022 г.

УДК 656.025.4

А. В. Суетина*
магистрант
А. В. Сумманен*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ АЦЕТОНА ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КАЛИНИНГРАД

В статье рассматривается вопрос организации транспортировки ацетона. Определяются способы перевозки груза, производится подбор специализированного подвижного состава, проводится подробный анализ условий, необходимых для транспортировки ацетона на железнодорожном, автомобильном и морском транспорте. Как итог, выбирается наиболее оптимальный и предпочтительный вариант транспортировки путем сравнения коммерческой работы по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *организация перевозки, технология транспортировки, специализированный подвижной состав, расчет стоимости и времени перевозки.*

A. V. Suetina*
Postgraduate Student
A. V. Summanen*
PhD, Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROPOSALS FOR THE ORGANIZATION OF ACETONE TRANSPORTATION FROM ST. PETERSBURG TO KALININGRAD

The article deals with the organization of acetone transportation. The methods of cargo transportation are determined, specialized rolling stock is selected, a detailed analysis of the conditions necessary for the transportation of acetone by rail, road and sea transport is carried out. As a result, the most optimal and preferred transportation option is selected by comparing commercial work on transportation routes.
Keywords: *organization of transportation, transportation technology, specialized rolling stock, calculation of the cost and time of transportation.*

Введение

В качестве груза выбран ацетон, нужно подобрать подвижной состав для его перевозки, рассчитать стоимость разных вариантов доставки, соблюсти технологию перевозки данного груза, выбрать оптимальный маршрут.

Ацетон является ценным бытовым и промышленным растворителем. Он относится к легковоспламеняющимся жидкостям класса опасности 3. Растворитель полностью лишен цвета, но имеет довольно резкий запах [1]. Транспортировка ацетона достаточно популярна. Это связано с тем, что технический ацетон используется в качестве растворителя для изготовления, например, лаков, масел, смол, взрывчатых веществ и многого другого, а также для чистящих средств и как средство для ежедневного удаления жира. Производят ацетон из пропена. Ацетон не сильно токсичен, с его помощью растворяют нитролаки, нитрокраски и органические вещества, обезжиривают керамические, металлические, деревянные, бетонные и другие поверхности. Также растворитель используют в качестве обезжиривателя поверхностей перед окрашиванием и с его помощью удаляют загрязнения с тканевых материалов. Ацетон используют в качестве исходного сырья в некоторых химических синтезах. Ацетон растворяет клей, некоторые соли и другие органические вещества. Используется при производстве искусственного шелка и синтетической кожи, смазочных масел, бездымного пороха, кинопленки.

Актуальность работы обусловлена тем, что Калининградская область не имеет сухопутной границы с основной территорией России, но соединена с ней Балтийским морем, и имеет не-

стандартные маршруты перевозки грузов. В Калининградской области находятся не большие запасы ацетона, вследствие чего разработка предложений по организации перевозки является актуальной.

Обоснование вида транспорта и транспортных средств

Транспортные характеристики: ацетон – легковоспламеняющаяся жидкость, температура вспышки – минус 18°С, температура самовоспламенения – 500°С; температурные пределы воспламенения паров в воздухе: нижний – минус 20°С, верхний – 6°С; концентрационные пределы воспламенения паров в воздухе: нижний – 2,2%, верхний – 13%; мин. энергия зажигания паров в воздухе – 0,0006Дж [1].

В статье рассматривается организация транспортировки ацетона из Санкт-Петербурга в Калининград маршрутами:

1. Смешанная перевозка автомобильным и морским транспортом.
2. Прямая перевозка морским транспортом.
3. Прямая перевозка автомобильным транспортом.
4. Прямая перевозка железнодорожным транспортом.

Следовательно, для осуществления перевозки по данным маршрутам будет использован следующий подвижной состав.

При транспортировке по маршруту № 1рассмотрим Контейнеровоз Kassbohrer SHFT, а также грузовой паром «АМБАЛ». Технические характеристики данного контейнеровоза можно найти в публикации «Контейнеровоз Kassbohrer

Рис. 1. Транспорт для перевозки ацетона по маршруту № 1

SHFT для перевозки танк-контейнеров» [4]. Паромные грузовые сообщения из Калининграда и области в Санкт-Петербург и обратно осуществляет грузовой паром «АМБАЛ» и паром “Балтийск”. Подвижной состав для первого маршрута представлен на рис. 1. С техническими характеристиками выбранного грузового парома можно ознакомиться в публикации на портале проекта Корабел.ру (портал по судостроению, судоходству и судоремонту) [5]. Транспортировка ацетона осуществляется в танк-контейнерах.

При транспортировке по маршруту № 2 будет использовано судно Проект RST27/Метаноловоз, представленный на рис. 2.

Технические характеристики судна Проект RST27/Метаноловоз можно найти в галерее судов МНП (Морские и нефтегазовые проекты) [6].

Перевозку на судах можно осуществлять летом и весной.

При транспортировке по маршруту №3 была выбрана цистерна ADR (рис. 3).

Технические характеристики цистерны ADR можно найти в каталоге компании УралХимТранс [7].

Она выполнена из нержавеющей стали, особенно устойчивой к коррозии (марка стали AISI 316).

При транспортировке по маршруту № 4 будет использована:

1. Цистерна с верхним сливом для перевозки ацетона модель 15-1280. Завод-изготовитель: ОАО «Рузаевский завод химического машиностроения» (клеймо 1167) [3].

2. IBC-контейнеры. IBC-контейнеры перевозятся в открытом и закрытом железнодорожном подвижном составе. Можно использовать крытый вагон с наибольшим объемом модели 11-2151 сочлененного типа с раскрывающейся крышей.

Подвижной состав представлен на рис. 4.

Технические характеристики цистерны 15-1280 и крытого вагона 11-2151 представлены в проекте vagon.by (сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве) [3].

Загрузка IBC-контейнеров в два яруса в крытый ЦМВ представлена на рис. 6. Для обеспечения устойчивости штабелей груза и предохранения упаковки от повреждения между ярусами укладывают настилы из досок толщиной не менее 20 мм.

Транспортная маркировка груза

Цистерна маркируется надписью «Огнеопасно» и трафарет приписки. Бочки и бутыли маркируют согласно ГОСТ-14192.

В избегании утечки ацетона емкость должна быть герметична, исправна и без повреждений.

Также наносятся дополнительные обозначения: название продукта, сорт, массу нетто и брутто, дату производства, партии номер, обозначение стандарта, знак опасности согласно ГОСТ 19433 (3 кл., 3.2 подкл., 3212 шифр), номер ООН-1090, знак «Беречь от огня».

Так же маркируются бочки при перевозке автомобилем. На бутыли табличка «Верх», «Осторожно. Хрупкое» [1].

При транспортировке железнодорожным транспортом так же устанавливают знаки опасности внутри и снаружи дверей. Если контейнер-цистерна или контейнер универсальный то со всех сторон и сверху. Если вагон-цистерна то на боковых сторонах.

Устанавливаются таблички на ТС (рис. 6).

Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального вариантатранспортировкиацетонанеобходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки.

Описание маршрута № 1: Санкт-Петербург – порт Бронка транспорт автомобиль в танк контейнере; порт Бронка – порт Калининград морской транспорт в танк-контейнере**.** Маршрут составляет – 1081 км.

Описание маршрута № 2: порт Санкт-Петербург – порт Калининград морской транспорт на судне химовозе. Маршрут составляет – 1030 км.

Описание маршрута № 3: Санкт-Петербург – Литва, Калининградская область транспорт автомобильный в цистерне по книжке МДП. Маршрут составляет – 956 км.

Описание маршрута № 4: ж.д. станция Санкт-Петербург – Завережье (РЖД) – Езерище – Гудогай (БЖД) – Кяна – Кибартай (Лит.ЖД) – Чернышевская – Калининград (РЖД) в железнодорожной цистерне и крытом вагоне в IBC контейнерах. Маршрут составляет – 1310 км [2].

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Расчет стоимости транспортировки железнодорожным транспортом сделан по тарифам (Прейскурант № 10-01, МТТ и СМГС).

Расчет стоимости перевозки на автомобильном транспорте осуществлялся согласно тарифным ставкам, прописанным в Прейскуранте № 13-01-01, а при перевозке морским транспортом по тарифам Прейскуранта № 14-01, а также на основе – базовой ставки фрахта, ставки за стоянку, стоимости хода судна, стоимости ПРР,

Рис. 2. Судно Проект RST27/Метаноловоз

Рис. 3. Цистерна ADR

расходов на оформление документации, портовых сборов, и различных видов надбавок.

Время рассчитывалось в зависимости от расстояния и скорости транспорта (на РЖД – 600 км/сутки, на автомобильном – 50 км/ч, на морском варьируется в пределах 11-14 узлов), а также на продолжительность перевозки влияет время на ПРР и время на переоформление документов.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок

Маршрут	Количество ПС и его вид	Протяженность маршрута, км	Время доставки, сут	Стоимость, руб.
Автомобильный	255 автоцистерн	956	3-4	78441315
Железнодорожный	108 цистерн 140 крытых вагонов	1310	3-4	36616148 38430411
Морской	1 химовоз	1030	3	75101072.1
Смешанная перевозка	156 авт. конт-в 1 контейнеровоз	69 (авто) 1012 (море)	3	15345688,7

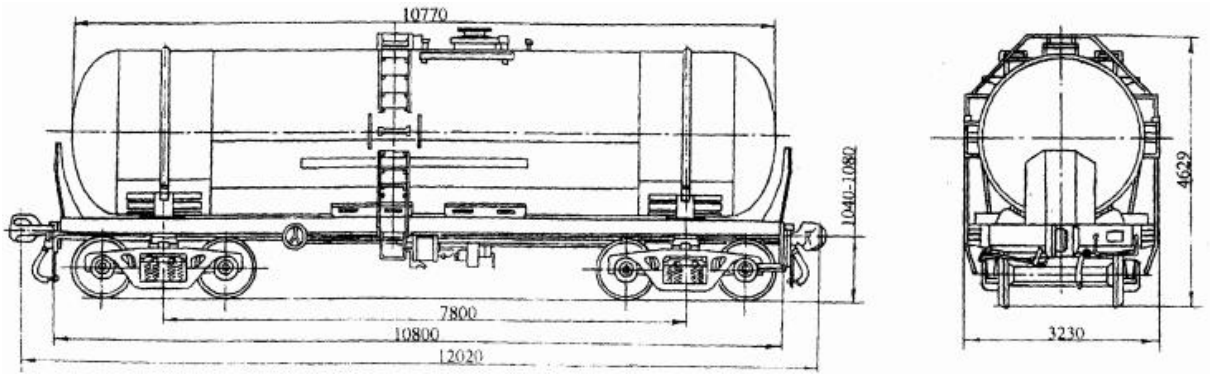


Рис. 4. Транспорт для перевозки ацетона по маршруту № 4

Рис. 5. IBC-контейнеры в крытом цельнометаллическом вагоне

Рис. 6. Табличка с идентификационным номером опасности и номером ООН и знак опасности

Рис. 7. Общая схема маршрутов перевозки ацетона

Анализ показателей перевозки на маршрутах

У автотранспорта самое большое количество необходимого подвижного состава, но он более выгодный с экономической точки зрения. Но, учитывая трудности и задержки при пересечении границ, это не самый рациональный вариант. Наиболее экономичный и быстрый маршрут-это смешанная перевозка.

Заключение

В данной статье были описаны основные транспортные характеристики ацетона, степень опасности груза и маркировка. Также был подобран специализированный железнодорожный, автомобильный и морской транспорт.

Главной задачей стояло – организовать перевозку ацетона из Санкт-Петербурга в Калининград с годовым объемом поставки 5700 т. Транспортировка флотского ацетона на территорию Калининградской области, нестандартна, так как при его доставке необходимо пересекать границы других государств. Перевозка любых грузов в регион Российской Федерации, не имеющий с ней сухопутной границы, это достаточно сложный и трудоемкий процесс.

В качестве маршрутов были рассмотрено четыре мультимодальные перевозки. Анализируя способы транспортировки по критериям времени и стоимости наиболее выгодным является

смешанная перевозка (автомобильный и морской транспорт) – Маршрут № 1 Санкт-Петербург – порт Бронка транспорт автомобильный в танк-контейнере; порт Бронка – порт Калининград транспорт морской в танк-контейнере: тарифное расстояние данного маршрута 1081 км. Время перевозки – 3 суток. Стоимость перевозки – 15345688,7 руб.

Библиографический список

1. ГОСТ 2768-84 Межгосударственный стандарт. Ацетон технический. Технические условия (с Изменениями № 1, 2).

2. Тарифное руководство № 4 (ред. от 25.01.2016). Книга 1. Тарифные расстояния между станциями на участках железных дорог (утв. Советом по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества).

3. О вагонном парке и вагонном хозяйстве. URL: https://www.vagon.by (дата обращения: 05.04.22).

4. Технические характеристики Контейнеровоза Kassbohrer SHF T. URL: https://kassbohrer-rus.com/polupritsepy/kontejnerovozy/shf-t (дата обращения: 26.11.2022).

5. Технические характеристики парома «АМБАЛ». URL: https://www.korabel.ru/fleet/info/1512.html (дата обращения: 26.11.2022).

6. Технические характеристики судна Проект RST27 Метаноловоз. URL: http://www.mnpglobal.com/projects/projects-katalog/tankery-khimovozy/proekt-rst27/ (дата обращения: 24.11.2022).

7. Технические характеристики цистерны для перевозки химических продуктов и опасных грузов ADR. URL: http://уралхимтранс.рф/autopark/item/avtocisterny-dlya-perevozki-himicheskih-produktov-i-opasnyh-gruzov-adr (дата обращения: 23.11.2022).

УДК 656.025.4

А. А. Уварова*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ИЗ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ ИЗ ПЕТРОЗАВОДСКА (РФ) В ЗОЛИНГЕН (ФРГ)

В статье рассматривается вопрос организации транспортировки пиломатериалов из карельской березы. Проводится подробный анализ специализированного подвижного состава и необходимых для пиломатериалов условий для транспортировки автомобильным, железнодорожным и морским транспортом. Оптимальный вариант транспортировки определяется на основании сравнения коммерческой работы по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *пиломатериалы, карельская береза, бруски, подвижной состав, паллеты, доски, транспортные пакеты.*

A. A. Uvarova*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ORGANIZATION OF KARELIAN BIRCH LUMBER TRANSPORTATION FROM PETROZAVODSK RF TO SOLINGEN FRG

The article deals with the organization of Karelian birch saw-timbers transportation. A detailed analysis of the specialized rolling stock and the conditions of transportation by automobile, railroad and sea are carried out. The optimal variant of transportation is determined on the basis of comparison of commercial work on transportation routes.
Keywords: *sawn timber, Karelian birch, bars, rolling stock, pallets, boards, transport packages.*

Введение

Карельская береза – дорогая и востребованная порода, наряду с ценными экзотическими породами розового или красного дерева. Ее редкость, уникальный неповторимый рисунок и высокие технические характеристики определяют стоимость. Цена 1 кубометра материала начинается от 1500 долларов, поэтому чаще продажи осуществляются килограммами [1].

Основными импортерами российской карельской березы являются Германия, Чехия, Болгария, Монголия, Эстония, ОАЭ. Поставки осуществляются в брусках и досках [2].

Объемы в целом не значительны и редко превышают один-два вагона в месяц, что связано с эксклюзивностью производства и дороговизной изделий. Вместе с тем ввиду ограниченного числа фирм поставщиков и невозможностью их оперативной замены перевозки данной древесины должны осуществляться бесперебойно. В этой связи возникает необходимость рассчитать оптимальную партию древесины в брусках и досках и их комплектация в транспортных пакетах для перевозки различными видами транспорта.

Обоснование вида транспорта и подвижного состава

В статье рассматривается организация транспортировки пиломатериалов из карельской березы из Петрозаводска (Россия) в Золинген (ФРГ) четырьмя маршрутами:

1. Смешанная перевозка морским и железнодорожным транспортом.

2. Контрейлерная перевозка автомобилем, морским паромом, автомобильным транспортом.

3. Прямая перевозка железнодорожным транспортом.

Следовательно, чтобы минимизировать материальные и временные затраты для маршрутов смешанной перевозки, в качестве грузового помещения рассмотрим стандартный 45-футовый высокий широкий контейнер фирмы «High Cude Pallet Wide» [2].

Перевозка контейнеров морским транспортом осуществляется с помощью сухогруза «Василий Климов».

Транспортировка пиломатериалов по смешанному маршруту в контейнерах по железной дороге осуществляется с помощью железнодорожных платформ.

Маршрут № 1 включает в себя Петрозаводск – порт Санкт-Петербург речным транспортом, порт Санкт-Петербург – порт Росток морским транспортом, Росток – Золинген железнодорожным транспортом. Тарифное расстояние составит 2353 км.

Маршрут № 2 включает в себя Петрозаводск порт – Усть-Луга автомобильным транспортом, порт Усть-Луга – порт Калининград морским транспортом, Калининград – Золинген автомобильным транспортом. Тарифное расстояние составит 2794 км.

Маршрут № 3 является прямым маршрутом железнодорожным транспортом Петрозаводск – Золинген. Тарифное расстояние составит 2868 км.

1. По маршруту интермодальной перевозки в контейнере: речной порт Петрозаводск – порт Большой порт СПб речным транспортом; порт Большой порт СПб – порт Росток морским транспортом; порт Росток – Золинген железнодорожным транспортом. Перевозка осуществляется морским транспортом сухогруз «Василий Климов» (рис. 2).

2. По второму маршрут контрейлерной перевозки: Петрозаводск-порт Усть-Луга в тентованном полуприцепе автомобильным транспортом; порт Усть-Луга – порт Калининград на морском пароме; Калининград – Золинген в тентованном полуприцепе автомобильным транспортом с помощью седельного тягача Mercedes-Benz 3341 S и полуприцепа Kogel Cargo SN24 P 90-1.110 [3] (рис. 3).

3. По третьему маршруту перевозки: железнодорожная станция Петрозаводск– железнодорожная станция Золинген в крытом вагоне брусками и полувагоне досками. Тарифное расстояние составит 2868 км. Транспортировка происходит в крытом универсальном цельнометаллическом вагоне модели 11-1807-01 [5].

Транспортировка контейнеров автомобильным транспортом по маршруту смешанной перевозки осуществляется с использованием контейнеровоза-полуприцепа полуприцепа Kogel Cargo SN24 P 90-1.110 -1.110 [4].

Прямой маршрут № 3. Железнодорожный от порта Петрозаводск до порта Росток будет осуществлен с помощью крытого вагона модели 11-1807-01 [5].

Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального варианта транспортировки древесины необходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки, рис. 4.

Описание маршрута № 1. Маршрут № 1 состоит из трех частей. Первое, из Петрозаводска сухогрузом происходит транспортировка до Санкт-Петербурга. расстояние от Петрозавод-

Рис. 1. 45-фунтовый контейнер

Рис. 2. Внешний вид судна «Василий Климов»

а) б)

Рис. 3. Автомобильное транспортное средство для перевозки пиломатериалов из карельской березы: а – седельный тягач Mercedes-Benz 3341S; б – полуприцеп Kogel Cargo SN24 P 90-1.110

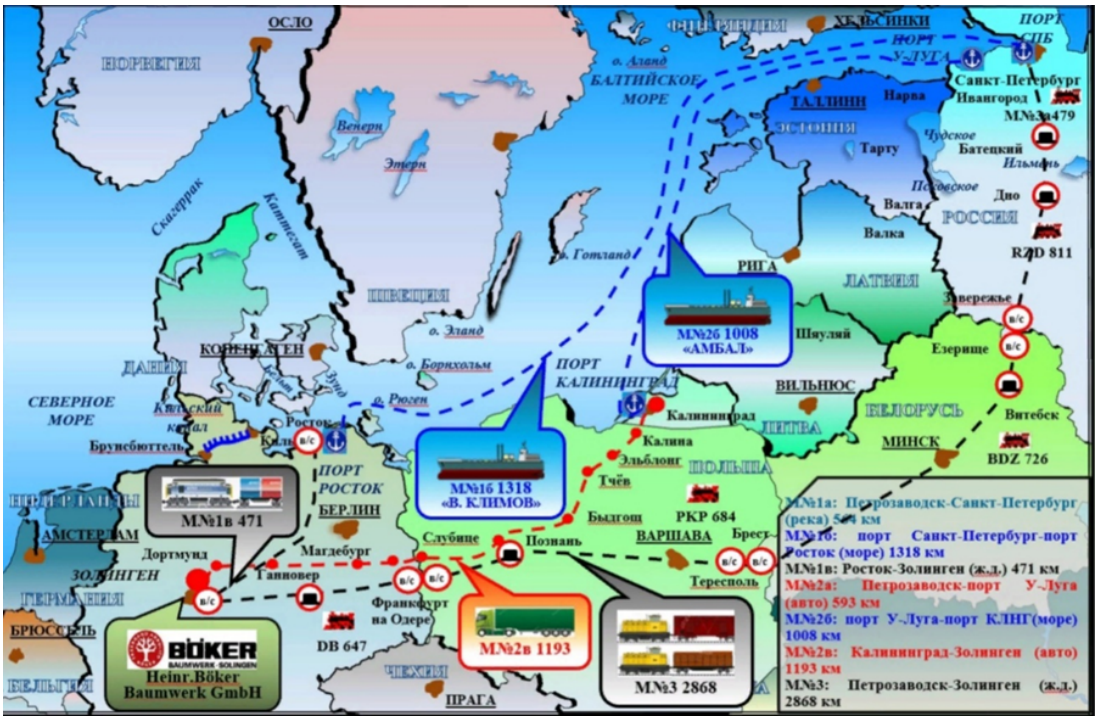


Рис. 4. Общая схема маршрутов

ска до Санкт – Петербурга речным транспортом. Тарифное расстояние составит 556,9 км +6 км, через Ладожское озеро. При скорости 10 узлов время составит 12 часов 30 минут. Осуществляется судном «Василий Климов» [6].

Второе, после того как груз будет доставлен до Санкт-Петербурга речным транспортом, произойдет перевалка груза на морской транспорт. Далее морским транспортом будет осуществлена перевозка Санкт-Петербург – Росток тарифное расстояние составит 1318 км. При средней скорости 13 узлов, расстояние 721 морская миля, время в пути составит примерно 4 суток.

Третья часть маршрута производится железнодорожным транспортом Росток – Золинген, 471 км протяженности.

Описание маршрута № 2. Первый этап маршрута включает в себя перевозку автомобильным транспортом Петрозаводск – Усть-Луга, время в пути: 6 ч 19 мин при скорости 90 км/ч. Тарифное расстояние 593 км.

Далее происходит транспортировка морским транспортом от Усть-Луга до Калининграда.

И последнее плечо подвоза – автомобильный маршрут Калининград – Золинген составит в пути 13 ч 40 минут.

Описание маршрута № 3. Третий вариант маршрута прямой железнодорожным транспортом время в пути 43 ч 45 минут, при скорости 120 км/ч. Тарифное расстояние составит 2868 км.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Итоговые стоимость и время доставки по маршрутам [7].

Маршрут № 1а: порт Петрозаводск – порт Санкт-Петербург по реке, расстояние маршрута 564 км.

Перевозка осуществляется сухогрузом «Василий Климов», грузоподъемностью 4182 т:

$$П = 7399{,}88 \times 66{,}62 = 492\,980,\,006 \text{ руб.}$$

$$Т_{дост} = 1882/18{,}52+3 = 104{,}61987041+3 = 107,\,8 \text{ часа} = 4{,}49 \text{ суток.}$$

Маршрут № 1б: перевозка осуществляется судном морским судном «Василий Климов»:

$$П = (1015\times2+800\times18{,}52\times0{,}015+1200\times2{,}21\times \times0{,}015+239\times2+210\times2)\times1{,}03+7\times63+0{,}58\times \times63+0{,}02\times63\times1882+0{,}005 = 7399{,}88$$

$$Т_{дост} = 1882/18{,}52+3 = 104{,}61987041+3 = 107,\,8 \text{ часа} = 4{,}49 \text{ суток.}$$

На маршруте № 1в: железнодорожная станция Росток – железнодорожная станция Золинген перевозка досок осуществляется в полувагоне с глухим кузовом модель 12-2143. Полувагон универсальный глуходонный с глухим кузовом, грузоподъемность 77,0 т, объем кузова 94,0 м^3.

$$П = 873 \times 66{,}62 = 58\,159,\,26 \text{ руб.}$$

$$Т_{дост} = \frac{471\text{км}}{600\text{км / сут}} + 0{,}4 \text{ сут} = 1{,}4 \text{ суток}$$

Перевозка пиломатериалов из № 2а: Петрозаводск – порт Усть-Луга осуществляется в тентованном полуприцепе Kogel Cargo SN24 P 90-1.110. Полуприцеп имеет грузоподъемность 24000 кг, внутренний объем кузова 91,2 м^3.

Стоимость данной перевозки рассчитывается по следующей формуле:

$$Т_{дост} = \frac{593 \text{ км}}{75 \text{ км / ч}} + 1 \text{ ч} = 0{,}3 \text{суток } (8{,}9 \text{ ч}).$$

Маршрут № 2б: Порт Усть-Луга – Порт Калининград расстояние – 1008 км.

Перевозка осуществляется с помощью парома.

$$П = 7234{,}13\times 66{,}62 = 481\,937,\,741 \text{ руб.}$$

Определение времени доставки груза производится по формуле:

$$Т_{дост} = 1008/18{,}52+2 = 56{,}42+2 = 58{,}42 \text{ часа} = 2{,}43 \text{ суток.}$$

Маршрут № 2в: Калининград – Золинген расстояние 1193 км, производится в тентованном полуприцепе в досках.

Исходя из грузоподъемности полуприцепа число досок -22000 : 12,13 = 1813,7 шт. Из грузовместимости количество досок – 91,2 : 0,01575= = 5790,47 шт.

Стоимость данной перевозки рассчитывается по следующей формуле:

$$П = 3\times\left(48\text{руб}\times1193\text{км} + 1009 + +5856 + 125\text{руб}\times91{,}2 \text{ м}^3\right) = 226\,587 \text{ руб.}$$

$$Т_{дост} = \frac{1193 \text{ км}}{75 \text{ км / ч}} + 1 \text{ сут } + 4 \text{ ч} = 1{,}8 \text{ суток } (43{,}2 \text{ ч})$$

Маршрут № 3: прямой маршрут протяженностью 2868 км Петрозаводск – Золинген. Доставка осуществляется в крытом универсальном цельнометаллическом вагоне модели 11-1807-01.

Таблица 1

Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок

Маршрут	Вид транспорта	Общее время на доставку	Общая стоимость в рублях
Маршрут №1	Морской Железнодорожный	4,49 суток 1,4 суток	492 980,006 58 159
Итого: 551 139,006 – стоимость, суток – 5, 89 – суток.			
Маршрут № 2	Автомобильный Морской Автомобильный	0,3 суток 2,43 суток 1,8 суток	131 559 481 937,741 226 587
Итого: 840 083,741 – стоимость, 4, 53 – суток.			
Маршрут № 3	Железнодорожный	7,38 суток	354 884,74
Итого: 354 884,74 – стоимость, 7,38 суток – суток.			

$$П = 5327 \times 66{,}62 = 354\ 884,\ 74 \text{ руб.}$$

$$Т_{дост} = \frac{2868км}{600км / сут} + 0{,}6 + 2 = 7{,}38 \text{ суток.}$$

Анализ показателей перевозки на маршрутах

Анализ данных таблицы показывает, что наиболее дорогостоящий получился маршрут № 2: Петрозаводск – порт Усть-Луга автомобильным транспортом, порт Усть-Луга – Калининград на морском пароме, Калининград – Золинген в крытом вагоне. Тарифное расстояние – 2794 км.

Также вполне очевидно, что из 1 и 3 маршрута, Петрозаводск – Золинген протяженностью 2868 км, обладает преимуществом во времени и цене. В обоих маршрутах задействован железнодорожный транспорт, который идеально подходит для данного груза и объема требуемой поставки 1 раз в 2 месяца.

Заключение

В статье описываются пиломатериалы из карельской березы, его транспортные характеристики. Также выбран подвижной состав на железнодорожном, автомобильном и морском транспорте и представлены маршруты транспортировки.

Так как поставка осуществляется 1 раз в 2 месяца, это дает возможность выбрать данный экономически выгодный маршрут.

Общая стоимость маршрута № 1 интермодальной перевозки в контейнере Морским транспортом – Петрозаводск – Большой порт СПБ, Порт Большой СПБ – Росток, Росток – Золинген железнодорожным, общая протяженность маршрута составила – 2353 км.

Общая стоимость маршрута № 2 контрейлерной перевозки Автомобильным транспортом от Петрозаводска – порт Усть-Луга, порт Усть-Луга – Калининград и Калининград – Золинген автомобильным, общая протяженность составила 2794 км. Цена на перевозку составила – 840 083,741 рублей, время – 5,63 суток.

Исходя проделанных расчетов наиболее выгодным маршрутом оказался маршрут №3 железнодорожным транспортом, расстояние его составило 2868 км. Время на доставку – 4,53 суток, цена – 354 884,74 рублей.

В результате, с помощью полученных расчетных данных делаем вывод, что экономически выгодым является прямой маршрут перевозки №3 (от порта Петрозаводск до порта Росток).

Библиографический список

1. Карельская береза – дерево с уникальной древесиной. URL: https://derevo-s.ru/drevesina/listvennye/karelskaya-bereza (дата обращения: 11.03.2022).

2. Свойства досок карельской березы. URL: https://71mebel.com/chto-delayut-iz-berezovoy-doski (дата обращения: 11.03.2022).

3. Краткий обзор, описание. Тентовый полуприцеп Cargo SNCS 24 P 90-1.110 производства Koegel. URL: https://gruzovoy.ru/catalog/technic/kogel_cargo_sn_24_p_90-1110. (дата обращения: 07.12.2021).

4. Технические характеристики вагона модели 11-1807-01 URL: https://vagon.by/model/11-1807-01 (дата обращения: 07.12.2021).

5. Транспортировка пиломатериалов морским транспортом. URL: https://sea-man.org/transportirovka-drevesiny.html. (дата обращения: 07.12.2021).

6. Продажа карельской березы на экспорт. URL: https://exportv.ru/vivoz/karelskaya-bereza-na-export#buy. (дата обращения: 02.12.2021).

7. *Уголков С. В., Майоров Н. Н.* Предложения по организации перевозки чая листового из Индии в Санкт-Петербург. Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. Иркутский филиал ФГБОУ ВО «МГТУ ГА». 2021. № 2. С. 24–35. DOI: 10.51955/2312-1327_2021_2_24.

УДК 629.052.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-278-281**

О. В. Фуфаева*
научный сотрудник
Ю. А. Исаев*
младший научный сотрудник
**Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации*

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДЕГРАДАЦИИ И ОТКАЗОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Описаны модели деградации и отказов средств измерений, основанные на использовании веерного распределения, DM-распределения и DN-распределения. Эти модели входят, как составная часть, в комплекс прикладных программ, предназначенных для моделирования процессов эксплуатации, деградации и обновления парка средств измерений. Приведены результаты сравнительного анализа моделей.
Ключевые слова: *парк средств измерений, модель эксплуатации, деградация, диффузионное распределение, марковская модель.*

O. V. Fufaeva*
Research Employee
Yu. A. Isaev*
Junior Research Employee
**FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation*

ON SIMULATION OF DEGRADATION AND FAILURE OF MEASURING INSTRUMENTS

Models of degradation and failures of measuring instruments based on the use of fan distribution, DM – distribution and DN – distribution are described. These models are included as an integral part in a set of application programs designed to simulate the processes of operation, degradation and renewal of the fleet of measuring instruments. The results of a comparative analysis of the models are presented.
Keywords: *park of measuring instruments, operation model, degradation, diffusion distribution, Markov model.*

Проблеме моделирования процессов эксплуатации, деградации и обновления парка средств измерений (СИ) посвящены работы [1–3]. В [1] основное внимание уделяется описанию процесса эксплуатации, в [2] проведено моделирование процесса эксплуатации с учетом деградации парка СИ. В [3] разработана модель, позволяющая проводить совместное моделирование процессов эксплуатации, деградации и обновления парка СИ. В этих работах моделирование процесса деградации СИ производится с использованием некоторых усредненных значений параметров, характеризующих деградацию (старение) парка СИ, в предположении, что по мере деградации вероятности ложного и необнаруженного отказов увеличиваются.

В настоящей работе проведен анализ используемых в настоящее время в инженерной практике моделей деградации и отказов СИ, представлено описание используемых в [3] моделей для расчета усредненных значений параметров деградации.

Выбор той или иной теоретической модели распределения отказов, учитывающих деградационные процессы СИ, в конечном итоге определяет точность расчетных показателей эффективности эксплуатации СИ. В настоящее время известно несколько схем формализации моделей отказов на основании анализа динамики определяющих параметров (ОП) [1, 4]. Случайный характер поведения ОП, обусловленный случайным характером воздействия внешней среды, а также стохастической природой строения материалов, использованных при изготовлении СИ, ставит определенные трудности на пути построения моделей деградации и отказов СИ. Описание процессов накопления повреждений и разрушений СИ случайными функциями общего вида приводит к громоздким аналитическим выражениям и сложным

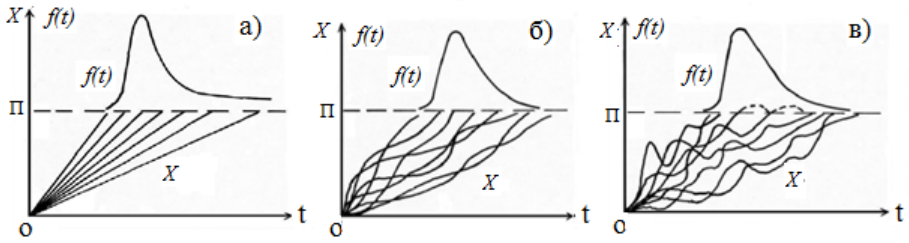


Рис. 1. Модель случайного процесса деградации и схема формирования распределения наработки до отказа: а – α-распределение (веерный процесс); б – DN-распределение; в – DM-распределение

алгоритмам расчета количественных характеристик надежности. Поэтому при построении моделей параметрических отказов СИ, отвечающих требованиям инженерной практики, обычно ограничиваются учетом сравнительно простых связей и типов случайных процессов.

Опишем модели, входящие в комплекс прикладных программ для моделирования процессов эксплуатации парка СИ [4]. В веерной модели, называемой также α-распределением [4], ОП представляется в виде линейной функции времени, изображенной на рис. 1, *а*.

Здесь t – время наработки на отказ; X – случайная величина ОП; П – нормированное значение ОП, при котором происходит отказ; f – плотность распределения наработки на отказ.

Распределение наработки до заданного нормированного уровня П задается функцией распределения [5, 6]:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{vt}\right), \qquad (1)$$

где Ф – функция нормированного нормального распределения; $\mu = 1/a$– параметр масштаба деградации, a – математическое ожидание скорости изменения ОП (средняя скорость процесса деградации), нормированное на предельное значение; ν – параметр формы (коэффициент вариации процесса деградации).

В основе модели «дрейфа метрологических характеристик» [3] лежит предположение о линейном законе изменения нулевой отметки СИ и экспоненциальном законе возрастания погрешности измерений:

$$m_0(t) = m_{00} + v_m t,\ \sigma(t) = \sigma_0 + \frac{v_z}{a_z}\left(\exp(a_z t) - 1\right),$$

где σ_0 – значение начальной погрешности, v_z – средняя начальная скорость возрастания погрешности, a_z – параметр, характеризующий ускорение возрастания погрешности, m_{00} – начальное значение дрейфа нуля (обычно принимается равным нулю), v_m – средняя скорость дрейфа нуля.

Описанные выше модели принадлежат к классу вероятностных моделей.

В настоящее время, помимо вероятностных моделей, в инженерной практике широко используются марковские модели деградации и отказов. При построении марковских моделей предполагается, что деградационный процесс можно аппроксимировать непрерывным марковским процессом диффузионного типа [7–9] и описывать стохастическим дифференциальным уравнением типа Ито:

$$dx(t) = A(t)dt + B(t)d\eta(t), \qquad (2)$$

где $x(t)$ – ОП; $A(t)$, $B(t)$ – детерминированные функции, характеризующие изменение среднего значения и дисперсии ОП (коэффициенты сноса и диффузии); $\eta(t)$ – случайная величина гауссовского типа.

Задача определения распределения времени до первого отказа СИ в данном случае сводится к решению задачи первого достижения ОП верхней границы П (см. рис. 1, *б* и 1, *в*). Данная задача может быть решена, если известна условная плотность вероятности перехода $\omega(t,x)$ процесса из одного состояния в другое.

Для марковского процесса диффузионного типа из (2) следует дифференциальное уравнение в частных производных (уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова):

$$\frac{\partial\omega(t,x)}{\partial t} + A(t)\frac{\partial\omega(t,x)}{\partial x} - \frac{[B(t)]^2}{2}\frac{\partial^2\omega(t,x)}{\partial x^2} = 0, \qquad (3)$$

где $A(t)$ и $B(t)$ – коэффициенты уравнения, зависящие от условий эксплуатации СИ и физико-химических процессов, протекающих в материалах, из которых изготовлено СИ. При решении (3) необходимо задавать граничные условия, которые зависят от вида реализации случайного процесса, в частности, от их монотонного характера (рис. 1, *б*) или немонотонного характера (рис. 1, *в*). Также необходимо задать начальные условия: $t = t_0$, $x = x_0$.

После нахождения функции $\omega(t_0, x_0; t, x)$, удовлетворяющей заданным начальным условиям, функция $f(t)$ плотности распределения времени достижения границы П (функция плотности распределения времени до отказа) может быть вычислена по формуле [4, 10, 11]:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{1} \frac{\partial \omega(t_0, x_0; t, x)}{\partial t} dx.$$

В случае одного ОП уравнение (3) может быть проинтегрировано аналитически. Функции распределения для диффузионного монотонного распределения (*DM*-распределения) имеет вид [4, 10, 11]:

$$F(t) = DM(t, \mu, v) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right), \qquad (4)$$

где $\mu = 1/a$.

График функции плотности распределения $f(t)$ для (4) при $\mu = 0{,}1$ изображен на рис. 2, *а*.

Функция распределения для диффузионного немонотонного распределения (*DN*-распределения) имеет вид [4, 10, 11]:

$$F(t) = DN(t, \mu, v) =$$
$$= \Phi\left(\frac{t-\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{t+\mu}{v\sqrt{\mu t}}\right). \qquad (5)$$

График соответствующей функции плотности распределения $f(t)$ при $\nu = 0{,}8$ изображен на рис. 2, *б*.

Интенсивность отказов для *DM*-распределения имеет вид:

$$\lambda(t) = \frac{(t+\mu)\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{2vt\sqrt{2\pi\mu t}\,\Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right)},$$

а для *DN*-распределения имеет вид:

$$\lambda(t) = \frac{(vt\sqrt{2\pi t})^{-1}\sqrt{\mu}\exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]}{\Phi\left(\frac{\mu-t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right)\Phi\left(-\frac{\mu+t}{v\sqrt{\mu t}}\right)}.$$

Таким образом, плотности распределения $f(t)$, функции распределения $F(t)$, интенсивности отказов $\lambda(t)$ рассчитываются по конечным аналитическим формулам с использованием стандартной функции Лапласа $\Phi(t)$.

Процесс деградации механических узлов СИ, вследствие необратимости процессов разрушения (механическое изнашивание, усталостное выкрашивание и т. д.), рассматривается как процесс с монотонными реализациями случайной величины. *DM*-распределение используется для узлов СИ, содержащих электромеханические элементы (контакты реле и разъемов, скользящие электрические контакты, зубчатые передачи и т. д.).

Процесс деградации СИ, включающих в свой состав интегральные схемы и сложные радиоэлектронные приборы, имеет и немонотонные реализации случайной величины. Поэтому деградация таких СИ описывается *DN*-распределением.

Рассмотренные в статье модели деградации и отказов существенно различаются с физической точки зрения. В частности, веерный процесс предполагает, что его характеристики полностью определяются начальным состоянием (качеством изготовления образцов СИ) и не зависят от механических, физических и химических процессов деградации, протекающих в схемах и механизмах СИ под действием внешних условий и времени.

Модель дрейфа метрологических характеристик наглядно демонстрирует уход нулевой отметки СИ и увеличение погрешности измерений с течением времени. Модель предполагает предварительную обработку статистических данных с целью определения оценок параметров дрейфа.

Марковские модели (4), (5) основаны на использовании вероятностных характеристик, условий эксплуатации СИ, а также на использовании физических и химических свойств материалов. Достоинством марковских моделей является то, что они имеют точные аналитические выражения для всех статистических характеристик, включая статистические моменты. А для статистических моментов веерного α-распределения (1) не существует аналитических выражений. Указанные моменты определяются приближенными зависимостями, что усложняет использование веерного распределения на практике.

Кривая плотности *DM*-распределения занимает промежуточное положение между широко применяемым на практике нормальным распределением (которое является симметричным) и более вытянутым α-распределением.

Кривые плотностей *DN*-распределения и α-распределения имеют более значительный порог нечувствительности, более положительный эксцесс и являются более асимметричными, чем *DM*-распределение.

Анализ графиков функций распределения показывает, что распределения (1), (4), (5) имеют разные зоны высокой надежности. Это означает, что оценка квантилей малого уровня, т. е. назначение гамма-процентного ресурса, существенно зависит от выбранного типа модели отказов СИ.

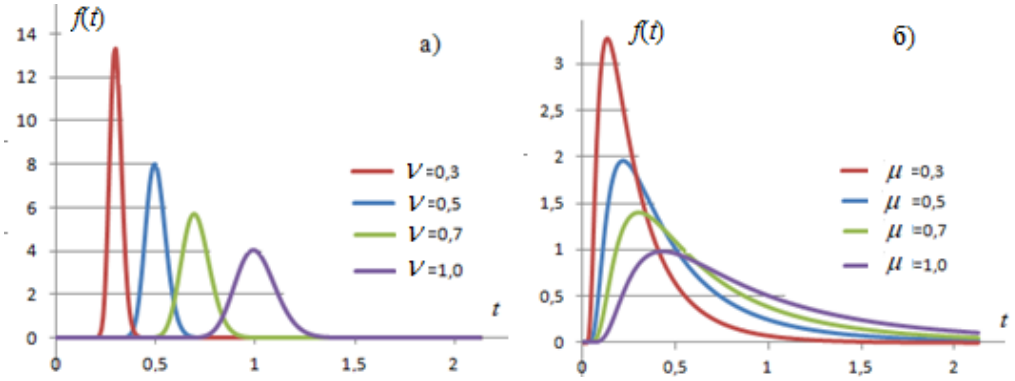


Рис. 2. Диффузионные распределения: а – DM-распределение; б – DN-распределение

Диффузионные модели могут быть достаточно просто параметризованы при наличии статистической информации. Например, при параметризации на основе статистических данных по моментам отказов $\{t_i,(i=1,2,...,N)\}$ оценки параметров $\breve{\mu}$ и $\breve{\nu}$, рассчитанные по методу максимального правдоподобия, для *DM*-распределения имеют вид:

$$\breve{\mu}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}t_i,\quad \breve{\upsilon}=\sqrt{\breve{\mu}}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{t_i}-N\left(\sum_{i=1}^{N}t_i\right)^{-1}\right]^{1/2},$$

а для *DN*-распределения имеют вид:

$$\breve{\mu}=N\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{t_i}\right)^{-1}+\frac{N}{2}\left[\sum_{i=1}^{N}(\breve{\mu}+t_i)^{-1}\right]^{-1}-$$

$$-\left\{\frac{N^2}{4}\left[\sum_{i=1}^{N}(\breve{\mu}+t_i)^{-1}\right]^{-2}-\right.$$

$$\left.-N\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{t_i}\right)^{-1}\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}t_i-N\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{t_i}\right)^{-1}\right]\right\}^{1/2},$$

$$\breve{\upsilon}=\left(\frac{1}{\breve{\mu}N}\sum_{i=1}^{N}t_i+\frac{\breve{\mu}}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{t_i}-2\right)^{1/2}.$$

Таким образом, диффузионные модели являются более предпочтительными (адекватными), поскольку, в отличие от веерного распределения и модели дрейфа метрологических характеристик, могут быть применены для управления показателями деградации и надежности СИ на основе учета физических закономерностей, реализуемых через зависящие от времени переменные коэффициенты $A(t)$ и $B(t)$ в уравнении (3).

При моделировании процессов эксплуатации, деградации и обновления парка СИ [3] применяются те или иные модели деградации и отказов СИ в зависимости от целей исследования и конкретной решаемой задачи. Отметим также, что моделирование функционирования парка СИ, включающего различные виды и типы СИ, также возможно при использовании смеси [11] описанных выше распределений.

Библиографический список

1. *Сычев Е. В., Храменков В. Н., Шкитин А. Д.* Основы военной метрологии. М.: Военное издательство, 1993. 400 с.

2. *Попенков А. Я., Фуфаева О. В., Хайруллин Р. З.* Анализ моделей эксплуатации сложных технических систем с деградирующим метрологическим обеспечением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 247–254.

3. *Хайруллин Р. З.* Оптимизация процессов эксплуатации и обновления парка измерительной техники // Измерительная техника. 2022. № 8. С. 28–34.

4. *Азарсков В. Н., Стрельников В. П.* Надежность систем управления и автоматики: учеб. пособие. Киев: НАУ, 2004. 164 с.

5. *Дружинин Г. В.* Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.

6. *Проников А. С.* Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

7. *Баронс П. П., Звиедрис А. В., Салениекс Н. К.* Надежность и качество механических систем. Рига: Авотс, 1982. 85 с.

8. *Калугер Г. В.* О возможности представления процесса изменения состояний радиоэлектронной аппаратуры в процессе хранения марковской моделью // Прочность и надежность конструкций. Киев: Наукова думка. 1978. С. 69–74.

9. *Кордонский Х. Б., Фридман Я. В.* Некоторые вопросы вероятностного описания усталостной долговечности // Заводская лаборатория. 1976. № 7. С. 829–847.

10. *Бартлетт М. С.* Введение в теорию случайных процессов. М.: ИЛ, 1968. 384 с.

11. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории случайных процессов. М.: Наука, 1965. 254 с.

УДК 629.052.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-282-284**

О. В. Фуфаева*
научный сотрудник
Р. З. Хайруллин*,*
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Г. Л. Сафина**
кандидат технических наук, доцент
**Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации*
***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДРЕЙФА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Представлены результаты исследования разработанной авторами диффузионной модели дрейфа погрешности измерений измерительной техники, представляющей собой уравнение Фоккера – Планка – Колмогорова. Модель позволяет интегрально учитывать деградационные процессы, такие как пластические деформации, скопление дислокаций, электролитическая коррозия и т. д., происходящие в узлах и элементах измерительной техники. Результаты моделирования показали идентичность численного и аналитического решения уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова в одномерном случае.
Ключевые слова: *диффузионная модель, измерительная техника, функция плотности вероятности.*

O. V. Fufaeva*
Research Employee
R. Z. Khayrullin*,*
Dr. Sc. Phys.-Math., Senior Research Employee
G. L. Safina**
PhD, Tech., Associate Professor
**FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation*
***MGSU «Moscow State University of Civil Engineering»*

ON SIMULATION OF DRIFT OF MEASUREMENT ERROR OF MEASURING EQUIPMENT

The results of investigation of the diffusion drift model of measurement error of measuring equipment developed by the authors has been suggested. The model based on equation of Fokker-Planck-Kolmogorov. The model allows integral consideration of degradation processes, such as plastic deformations, accumulation of dislocations, electrolytic corrosion, etc., occurring in nodes and elements of measuring equipment. The simulation results showed the identity of the numerical and analytical solutions of the Fokker-Planck-Kolmogorov equation in one-dimensional case.
Keywords: *diffusion model, measuring equipment, function of density of distribution.*

Определение соответствия образца измерительной техники (ИТ) установленным требованиям производится на основе контроля величины ее определяющего параметра (ОП) [1]. В [2] проведен статистический анализ функций ошибок принятия решения при допусковом контроле ОП работоспособности компонентов авионики. В [3] описан метод допускового контроля ОП, выписаны формулы для ошибок 1 и 2 рода для произвольного закона распределения. Представлены результаты моделирования для случая, когда ОП является случайной величиной, распределенной по нормальному закону.

В настоящей работе в качестве ОП выбирается погрешность измерений. Для описания изменения ОП используется вероятностно-физическая диффузионная модель [4]. Процесс изменения ОП $x(t)$ аппроксимируется непрерывным марковским процессом диффузионного типа. Тогда $x(t)$ удовлетворяет стохастическому дифференциальному уравнением первого порядка (уравнение типа Ито): $dx(t) = A(x,t)dt + B(x,t)d\eta(t)$, где $A(x,t)$, $B(x,t)$ – детерминиро-

ванные функции, характеризующие изменение среднего значения и дисперсии ОП (коэффициенты сноса и диффузии); $\eta(t)$ – случайная величина гауссовского типа [4, 5].

Пусть $x_0 = x(t_0)$ – значение ОП в начальный момент времени t_0: а $x = x(t)$ – значение ОП в момент времени t. Не нарушая общности рассуждений, предположим, что в процессе эксплуатации и деградации ИТ в среднем происходит увеличение ОП. Задача определения времени достижения случайным процессом $x(t)$ некоторого предельного значения $x = x^*$ при $t = t^*$ сводится к решению задачи первого достижения случайным процессом $x(t)$ верхней границы области $x = x^*$.

Одномерная функция плотности распределения вероятностей $\omega(x,t)$ удовлетворяет уравнению Фоккера – Планка – Колмогорова [4, 5]:

$$\frac{\partial \omega(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left[K_1(x,t)\cdot\omega(x,t)\right] + \frac{1}{2}\cdot\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[K_2(x,t)\cdot\omega(x,t)\right], \quad (1)$$

где $K_1(x,t)$ – коэффициент сноса ОП, $K_2(x,t)$ – коэффициент диффузии ОП. Начальные и граничные условия для уравнения (1) задаются в виде δ-функций, сосредоточенных в заданных точках [4].

Отметим, что функции $K_1(x,t)$, $K_2(x,t)$ определяются условиями эксплуатации ИТ, интенсивностью применения ИТ, сроком службы ИТ и т. д. С помощью этих функций могут быть интегрально учены деградационные процессы, такие как пластические деформации, скопление дислокаций, электролитическая коррозия и т. д., происходящие в узлах и элементах ИТ. Построение алгоритмов формирования функций $K_1(x,t)$, $K_2(x,t)$, учитывающих условия эксплуатации ИТ, представляет собой самостоятельную научную задачу, и в настоящей работе не рассматривается.

Отметим, что уравнение (1) в многомерном случае не может быть решено аналитически при произвольном задании функций $K_1(x,t)$, $K_2(x,t)$. Аналитическое решение для многомерного случая возможно только при некоторых специальных видах функций. Некоторые способы построения функций, допускающих аналитическое решение, описаны в [4].

Для построения аналитического решения в одномерном случае введем новые переменные [5]: $\tau = \phi(t)$, $y = \psi(x,t)$. Тогда плотность вероятности принимает вид:

$$\omega(x,t) = \omega_1\left(\psi(x,t),\phi(t)\right)\cdot\left|\psi'_x\right| = \omega_1\left(y,\tau\right)\cdot\left|\psi'_x\right|,$$

где $\omega_1(y,\tau)$ – новая функция плотности распределения вероятностей ОП. Подбирая функции $\phi(t)$ и $\psi(x,t)$, можно определить новые коэффициенты сноса и диффузии $K_1(y,\tau)$ и $K_2(y,\tau)$ так, чтобы из уравнения (1) после перехода к новым переменным можно было найти функцию $\omega_1(y,\tau)$ аналитически.

Предположим, что коэффициент K_1 зависти от x линейно, а K_2 не зависит от x:

$$K_1(x,t) = a(t)x + b(t), \quad K_2(x,t) = c(t).$$

Тогда

$$\phi(t) = \int_{t_0}^{t} c(\varsigma)e^{-2\int_{t_0}^{\varsigma} a(\xi)d\xi}\,d\varsigma,$$

$$\psi(x,t) = xe^{-\int_{t_0}^{t} a(\xi)d\xi} - \int_{t_0}^{t} b(\varsigma)e^{-\int_{t_0}^{t} a(\xi)d\xi}\,d\varsigma,$$

где $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ – являются функциями времени.

В этом случае уравнение (1) принимает вид простейшего параболического уравнения: $\frac{\partial \omega_1(y,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{2}\frac{\partial^2 \omega_1(y,\tau)}{\partial y^2}$, решение которого имеет вид:

$$\omega_1(y,\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\tau-\tau_0)}}e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2(\tau-\tau_0)}}.$$

Для случая постоянных коэффициентов: $a(t) = a$, $b(t) = b$, $c(t) = c$ функции $\phi(t)$ и $\psi(x,t)$ имеют вид:

$$\phi(t) = \frac{c(1-e^{-2a(t-t_0)})}{2a},$$

$$\psi(x,t) = xe^{-a(t-t_0)} - \frac{b(1-e^{-a(t-t_0)})}{a}.$$

Явный вид плотности распределения вероятностей процесса $x(t)$:

$$\omega(x,t) = \left[\exp\left(-a(t-t_0) - \frac{\left(-(b/a)\left(1-e^{-a(t-t_0)}\right)+xe^{-a(t-t_0)}-x_0\right)^2}{(c/a)\left(1-e^{-a(t-t_0)}\right)}\right)\right] \Big/ \sqrt{(\pi c/a)\left(1-e^{-2a(t-t_0)}\right)}. \quad (2)$$

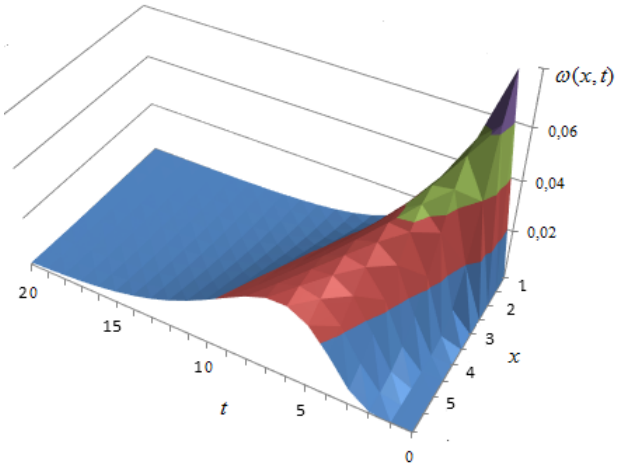


Рис. 1. Функции плотности распределения вероятности $\omega(x,t)$

Двумерная поверхность плотности вероятности $\omega(x,t)$ при $a = 0{,}01$, $b = 0{,}8$, $c = 0{,}1$, $x_0 = 1$ имеет вид, изображенный на рис. 1.

Для рассматриваемого в настоящей работе класса ИТ характерное время наработки (эксплуатации) ИТ составляет t = 10-20 лет, и в процессе деградации ИТ погрешность увеличивается в 3-6 раз.

С целью проверки адекватности аналитической модели (2) уравнению (1) было проведено численное решение уравнения (1) с использованием программного обеспечения Mathematica 5/6/7/ [6] по неявной схеме в прямоугольной области. Соответствующая система линейных алгебраических уравнений решалась методом прогонки. Расчеты показали, достаточно высокое сходство соответствующих двумерных поверхностей $\omega(x,t)$. Было проведено сравнение значений функций $\omega(x,t)$, построенных аналитически и численно в узловых точках сетки с шагом $\Delta x = 0{,}1$ и $\Delta t = 0{,}01$. Сравнение показало, что отличие составляет не более 1%.

Таким образом, результаты численного моделирования показали идентичность численного и аналитического решения в одномерном случае. В настоящее время продолжаются исследования в част и одновременного учета двух и трех ОП метрологических характеристик (исследования двумерной и трехмерной модели).

Библиографический список

1. *Сычев Е. И., Храменков В. Н., Шкитин А. Д.* Основы метрологии военной техники. М.: Военное издательство, 1993. 400 с.

2. *Грибов В. М., Смолич Д. В.* Статистический анализ функций ошибок принятия решения при допусковом контроле работоспособности компонентов авионики // Математические машины и системы. 2014. № 2. С. 128–136.

3. Mathematical simulation of decision error functions in tolerance control of the performance of measuring techniques / R. Z. Khayrullin, A. S. Kornev, A. A. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. № 9. P. 680–685.

4. *Азарсков В. Н., Стрельников В. П.* Надежность систем управления и автоматики: учебное пособие. Киев.: НАУ, 2004. 164 с.

5. *Колмогоров А. Н.* Аналитические методы теории вероятностей // Успехи математических наук. 1938. Вып. V. 283 с.

6. *Дьяконов В. П.* Mathematica 5/6/7/: полное руководство. М.: ДМК-Пресс, 2010. 624 с.

УДК 629.052.9 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-285-287**

Р. З. Хайруллин*,*
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
С. И. Зубков*
начальник лаборатории
О. И. Бойцова*
научный сотрудник
**Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации*
***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ СПУСКЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ

Представлено решение задачи построения области достижимости космического аппарата при спуске в атмосфере. Область достижимости в плоскости параметров – конечная скорость полета, расход ресурса – строится на основе многократного решения задач оптимального управления с использованием принципа максимума Л. С. Понтрягина и теории особых оптимальных управлений. Установлено, что оптимальные траектории, приводящие на границу области достижимости, могут содержать как участки релейного управления, так и участки особого управления. Приведены примеры оптимальных управляющих функций.
Ключевые слова: *оптимальное уравнение, принцип максимума, космический аппарат, область достижимости.*

R. Z. Khayrullin*,*
Dr. Sc., Phys.-Math., Senior Research Empoyee
S. I. Zubkov*
Head of Laboratory
O. I. Boytsova*
Research Employee
**FSBI «MSMC» of the Ministry of Defense of the Russian Federation*
***MGSU «Moscow State University of Civil Engineering»*

SPECIAL CONTROL IN THE OPTIMIZIRING PROBLEMS OF SPACECRAFT DESCENT IN THE ATMOSPHERE

The solution of the problem of constructing the reachability region of a spacecraft during descent in the atmosphere is presented. The range of achievability in the plane of parameters is the final flight speed, resource consumption is based on multiple solutions of optimal control problems using the maximum principle of L.S. Pontryagin and the theory of special optimal controls. It is established that the optimal trajectories leading to the boundary of the reachability region can contain both relay control sections and special control sections. Examples of optimal control functions are given.
Keywords: *Optimal equation, maximum principle, spacecraft, reachability domain.*

Решение задач оптимального управления с использованием принципа максимума Л. С. Понтрягина [1] приводит к необходимости решения краевых задач для π-систем. Основная сложность при решении краевой задачи – построение подходящей параметризации семейства управлений, в которое входит оптимальная управляющая функция. Решение π-системы путем варьирования начальных условий для сопряженных переменных зачастую сопряжено со значительными вычислительными трудностями, связанными с выбором начального приближения для сопряженных переменных.

Одним из возможных подходов к решению задач оптимального управления является предварительное численное исследование задачи, выявление структуры оптимального управления, задание наиболее подходящей параметризации и решение краевой задачи для π-системы путем варьирования параметров.

В настоящей статье рассмотрена имеющая практическое значение задача [2], для которой оптимальная управляющая функция имеет участок особого управления. Такая задача является нестандартной, вырожденной задачей. Для ее решения вместе с принципом максиму-

ма [1] необходимо использовать специальные методы особого оптимального управления [3].

Плоское движение космического аппарата (КА) при спуске в атмосфере при некоторых предположениях [3] описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\rho(y)v^2}{2m}SC_x - g\sin\theta,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\rho(y)v}{2m}SC_x u - \frac{g}{v}\cos\theta,\ \frac{dy}{dt} = v\sin\theta,\ \frac{dr}{dt} = -u, \quad (1)$$

$$0 \le u \le 1,\ \ 0 \le t \le T, \quad (2)$$

где t – время полета, v – скорость, θ – угол наклона траектории, y – высота, r_0 – ресурс управления. В качестве управляющей функции выберем нормированный угол атаки $u = \alpha / \alpha_{\max}$, $\alpha_{\max}$ – предельно допустимое значение угла атаки $0 \le u \le 1$.

Начальные условия предполагаются заданными:

$$v(0) = v_0,\ \ \theta(0) = \theta_0,\ \ y(0) = y_0,\ \ r(0) = r_0,$$

где v_0 – начальная скорость, θ_0 – угол наклона траектории в начальный момент времени, y_0 – начальная высота, r_0 – начальное значение ресурса управления.

Рассмотрим терминальные функционалы:

$$F_1[u(\cdot)] = v(T) - v_{1k},\ \ F_2[u(\cdot)] = y(T) - y_{1k},$$
$$F_3[u(\cdot)] = r(0) - r(T),$$

где v_{1k}, y_{1k} – требуемые конечные значения скорости и высоты.

Вариационную задачу сформулируем следующим образом: найти закон управления $u(t)$, удовлетворяющий системе уравнений (1) при ограничениях (2) и обеспечивающий минимальное (максимальное) значение расхода ресурса $F_3[u(\cdot)] \to \min$ ($F_3[u(\cdot)] \to \max$) при фиксированных значениях конечной скорости полета $F_1[u(\cdot)] = 0$ и конечной высоты полета $F_2[u(\cdot)] = 0$.

Систему уравнений (1) представим в виде:

$$\frac{dx}{dt} = f_0(x) + u \cdot f_1(x),\ \ 0 \le t \le T, \quad (3)$$

где $x = (v, \theta, y, r)$; $f_0(x)$, $f_1(x)$ – вектор функции правых частей уравнений (1).

Отметим, что управление входит в (3) линейно.

Обозначим $\psi(t)$ – вектор-функция сопряженных переменных [1], которая вычисляется путем интегрирования сопряженной системы уравнений с соответствующими краевыми условиями, зависящими от функционалов задачи. Для рассматриваемой в настоящей работе вариационной задачи функция Гамильтона тоже зависит от управления линейно:

$$H(x,\psi,u) = (f_0(x) + u \cdot f_1(x))\psi^* = \\ = H_0(x,\psi) + H_1(x,\psi)\cdot u, \quad (4)$$

где верхний индекс в виде звездочки у вектор-функции $\psi(t)$ означает операцию транспонирования. На оптимальном решении функция Гамильтона должна принимать максимальное значение [1]:

$$H(x(t),\psi(t),u(t)) = \\ = \max_{0\le u\le 1}\{H_0(x(t),\psi(t)) + u \cdot H_1(x(t),\psi(t))\}. \quad (5)$$

Расчеты показали, что на оптимальном решении функция $H_1(x,\psi)$ обращается в ноль на конечном отрезке времени. Поэтому однозначно определить управление на указанном отрезке времени из условия (5) не представляется возможным. На оптимальных траекториях реализуются, так называемые, участки особого режима управления [2,3], управляющая функция $u(t)$ принимает не предельно возможные значения 0 или 1, а внутренние значения $0 < u(t) < 1$.

Проведем основные результаты исследования [3] функции Гамильтона (4). Первая производная по времени от функции H_1 в силу уравнений движения (1) не зависит от u, а вторая производная от H_1 зависит от u линейно:

$$\ddot{H}_1(x,\psi,u) = A_2(x(t),\psi(t)) + B_2(x(t),\psi(t))\cdot u.$$

Поэтому, в соответствии с [2], порядок особого управления равен единице, для особых режимов управления должно выполняться необходимое условие Келли: $B_2(x(t),\psi(t)) > 0$ [3], и условие оптимального сопряжения (условие скачка) для особых и не особых участков управления [3]. Оптимальная управляющая функция на участке особого управления вычисляется по формуле [3]:

$$u(t) = -\frac{A_2(x(t),\psi(t))}{B_2(x(t),\psi(t))}, \quad (6)$$

а на остальных участках управляющая функция принимает предельно допустимые значения 0 или 1. Явные выражения для $A_2(x(t),\psi(t))$, $B_2(x(t),\psi(t))$ и условие оптимального сопряжения особых и не особых участков управления для рассматриваемой в настоящей работе задачи приведены в [2].

Область достижимости в плоскости параметров конечная скорость, расход ресурса $v(T)$, $r(T)$, построенная в результате решения серии

оптимизационных задач при разных значениях v_{1k}, является выпуклой (рис. 1).

Граница области имеет два излома в точках, где скорость принимает минимальное $v^*_{\min}$ и максимальное $v^*_{\max}$ значение. Траектории, приводящие на нижнюю часть границы области достижимости, реализуются при релейном управлении (управляющая функция принимает только предельные значения 0 или 1). Траектории, приводящие на верхнюю часть границы области достижимости, реализуются как при релейном, так и при особом управлении (участок границы от v^*_{oc} до v^{**}_{oc}). На участке границы от $v^*_{\max}$ до некоторого значения v^*_{oc} управляющая функция является релейной с двумя точками переключения (рис. 2). На этом же рисунке приведен график функции $H_1(x,\psi)$, позволяющий отследить в каких точках происходит переключение управления.

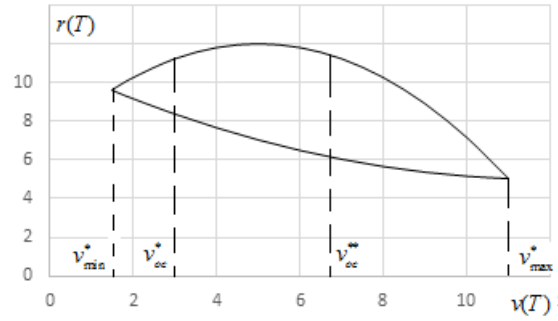


Рис. 1. Область достижимости в плоскости параметров «конечная скорость, расход ресурса»

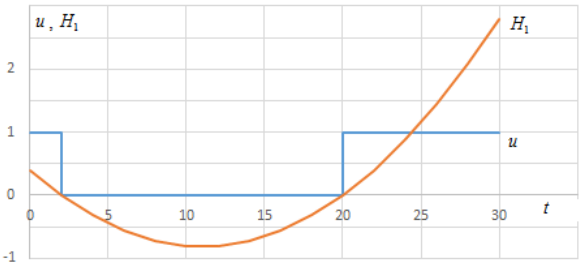


Рис. 2. Оптимальная релейная управляющая функция

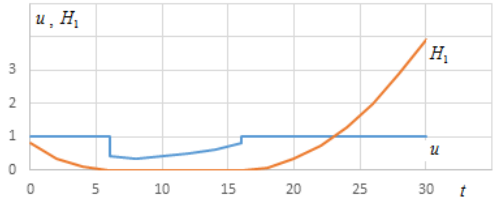


Рис. 3. Оптимальная управляющая функция, содержащая участок особого управления

На верхней границе при изменении требуемой конечной скорости от значения v^{**}_{oc} до значения v^*_{oc} управляющая функция имеет участок особого управления (рис. 3), на котором управляющая функция вычисляется по формуле (6) и принимает значения $0 < u < 1$. На рисунке также приведен график функции $H_1(x,\psi)$, которая тождественно равна нулю на участке особого управления.

Найденные оптимальные управляющие функции допускают достаточно простую параметризацию. В качестве параметров при решении краевой задачи для π-системы использовались точки переключения управления между максимальными и минимальными предельно возможными значениями, а также между предельно возможными значениями и особыми участками управления. Представленные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления космическим аппаратом.

Библиографический список

1. *Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В.* [и др.]. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 392 с.

2. *Хайруллин Р. З.* Особые управления и скользящие режимы в задачах оптимизации при спуске КА в атмосфере // Препринт Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. 1994. № 69. 28 с.

3. *Габасов Р., Кириллова Ф. М.* Особые оптимальные управления. М.: Наука, 1973. 256 с.

УДК 656.025.4

М. П. Черпакова*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ФЕНОЛА ИЗ НОВОКУЙБЫШЕВСКА (РФ) В БАНГАЛОР (ИНДИЯ)

В статье рассматривается вопрос организации транспортировки фенола. Проводится подробный анализ специализированного подвижного состава и необходимых для перевозки опасного вещества, условий для транспортировки на воздушном, морском, железнодорожном и автомобильном транспорте. Оптимальный вариант транспортировки определяется на основании сравнения коммерческих показателей по маршрутам перевозки.
Ключевые слова: *фенол, организация перевозки, опасное вещество, стоимость перевозки, время перевозки, технология транспортировки.*

M. P. Cherpakova*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF ORGANIZING THE TRANSPORTATION OF PHENOL FROM NOVOKUIBYSHEVSK RUSSIAN FEDERATION TO BANGALORE INDIA

The article deals with the organization of transportation of phenol. A detailed analysis of specialized rolling stock and necessary conditions for transportation of dangerous substance by air, sea, railway and automobile transport is carried out. Optimal transportation option is determined on the basis of comparison of commercial work on transportation routes.
Keywords: *phenol, transportation organization, dangerous substance, refrigerated container, transportation cost, transportation time, transportation technology.*

Введение

Фенол (гидрокс бензол или карболовая кислота) – органическое соединение, беловатого цвета с резким запахом, быстро окисляется и улетучивается. Согласно ГОСТ 23519-93 фенол принадлежит к 6 классу опасности, подкласс 6.1 – ядовитым веществам, классификационный шифр 6112, фенола раствор 6113, номер ООН 2312, аварийная карточка № 608, 615 [1].

Карболовая кислота – это опасное вещество для окружающей среды. Он хорошо растворим в воде, но медленно биоразлагается. По воздействию на человека относится к высокоопасным растворам. Разрешенная ПДК в воздухе – 0,3 мг/м^3 [2].

Применение фенола:

– 44% расходуется на изготовление бисфенола А (поликарбонаты и эпоксидные смолы);

– 30% используется на фенолформальдегидные смолы;

– 12% фенола для создания ненатуральных волокон – нейлона и капрона [3].

В Российской Федерации фенол используется в нефтеперерабатывающей области (селективное очищении масел). Он находится в составе многих духов, пластификаторов, средств защиты растений, медицине, молекулярной биологии и генной инженерии.

Обоснование вида транспорта и подвижного состава

В статье рассматривается организация транспортировки фенола из Новокуйбышевска (Российская Федерация) в Бангалор (Индия) тремя маршрутами:

1. Прямая перевозка воздушным транспортом.

2. Мультимодальная перевозка железнодорожным, автомобильным и морским транспортом.

3. Мультимодальная перевозка морским и автомобильным транспортом.

Фенол перевозится по ж.д в собственных или арендованных вагонах грузоотправителя (грузополучателя), оснащенных обогревом. Цистерны должны быть обязательно из нержавеющей хромоникелевой стали, углеродистой стали с цинковым покрытием или углеродистой стали. При сливо-наливных операциях и в трубопроводе фенол должен быть (60 ± 10) °С. Поэтому, чтобы уменьшить материальные и временные затраты для маршрутов смешанной перевозки, берем стандартный 40-футовый танк–контейнер IMO1, типа T11 [4].

Танк-контейнеры T11 перевозятся по две единицы на автомобиле – контейнеровозе или железнодорожной платформе (рис. 2). Наилучшим вариантом будет выбрать полуприцеп контейнеровоз Krone Box liner (рис. 2) [5].

Для транспортировки танк-контейнеров с расплавленным фенолом используется железнодорожная платформа для танк-контейнеров модели 13-6953 (рис. 3). На платформу размещается по 2 танк-контейнера [6].

Рис. 1. Танк-контейнер T-11 с нижним сливом

Карболовая кислота транспортируется в химических автоцистернах кислотовозах. Исходя из технических данных была выбрана полупри-

Рис. 2. Полуприцеп контейнеровоз Krone Box liner

Рис. 3. Железнодорожная платформа модели 15-1603-01

цеп-цистерна «Сеспель» (рис. 4). Цистерна оснащена: термоизолированным, изотермическим корпусом; автономным подогревом для поддержания температуры; паровой рубашкой для бесконтактного разогрева груза от источника пара или горячей воды; перепускными и дыхательными клапанами; емкости ППЦ изготовлены из высококачественной нержавеющей или углеродистой стали со специальным покрытием [7].

Для осуществления перевозки на автомобильном транспорте с использованием полуприцепа-контейнеровоза и полуприцепа-цистерны, необходимо использовать седельный тягач (рис. 5).

HINO 700 SS – седельный тягач, который используется для перевозки разного вида грузов в составе автопоезда (с использованием полуприцепов).

Перевозка фенола воздушным транспортом из аэропорта Самары до аэропорта Бангалора происходит в тарно-бочковой упаковке на грузовом самолете Boeing747-8F (рис. 6) [8].

Правила перевозки фенола воздушным транспортом: жидкий фенол заливается в пластиковые баки объемом 60 л (инструкция по упаковыванию № 662) или металлические бочки типа 1А1 объемом 220 л (инструкция по упаковыванию № 663).

Рис. 4. Полуприцеп-цистерна кислотовоз «Сеспель»

Рис. 5. Седельный тягач HINO 700 SS

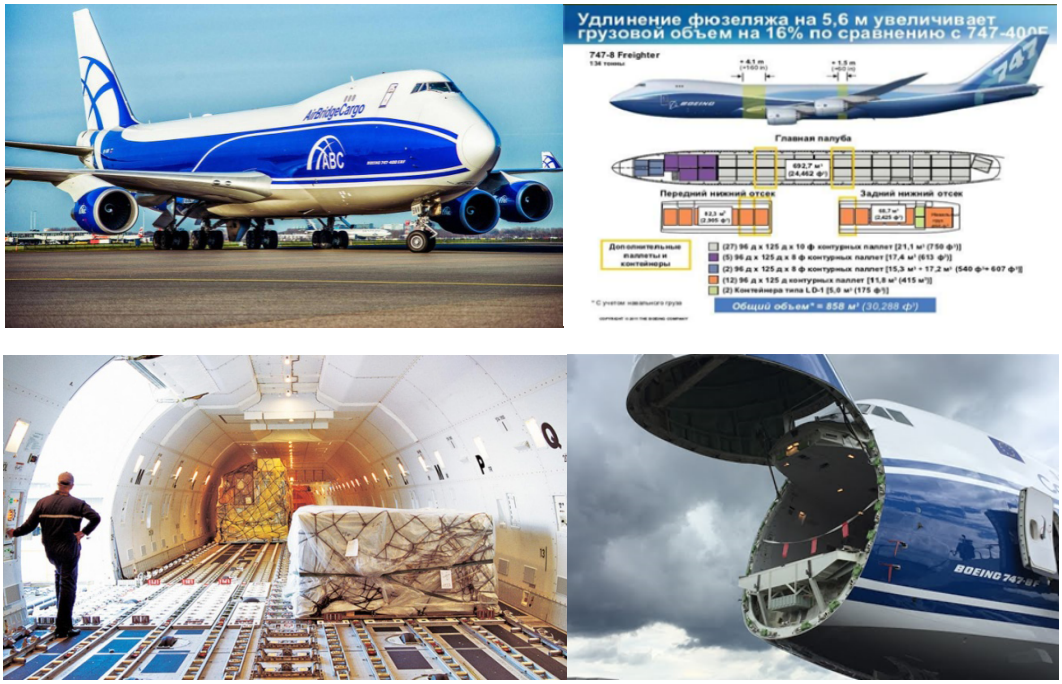


Рис. 6. Грузовой самолет Boeing747-8F для перевозки фенола

Рис. 7. Бочки 1A1 на FIN паллете

Для транспортировки используются бочки с несъемным верхним дном типа 1A1 вместимостью 216,5 дм^3, верхним сливом, размерами 882х585 мм и массой 18,2 кг. Бочки ставятся по 4 шт. на FIN паллете, размером1000х1200 мм (ГОСТ 13950-91) [9].

Для транспортировки фенола морским и водным транспортом будут использоваться *суда* Berkarar и SUNNY (рис. 8).

Транспортная маркировка груза

Для перевозки грузов 6 класса опасности необходимы дополнительные требования к безопасности упаковки, выполнению ПРР, к средствам индивидуальной защиты. При транспортировке тара и упаковка груза 6 класса опасности допускается исключительно заводская и не должна иметь трещин. Упаковка и транспортные средства при перевозках 6 класса опасности обязаны содержать маркировку и знаки опасности.

Транспортная маркировка тары для перевозки фенола выполняется по ГОСТ 57479-2017 с нанесением манипуляционных знаков [10].

Характеристика маршрутов

Для определения оптимального маршрута и вида транспорта перевозки катализаторов необходимо произвести сравнительный анализ характеристик коммерческих показателей реально существующего трафика. Варианты маршрутов представлены на рис. 10.

Описание маршрута № 1: аэропорт Самара (Курумоч) – аэропорт Бангалор (Кемпенгоуда) на грузовом самолете Boeing747-8F в бочках с

Рис. 8. Суда Berkarar и SUNNY

Рис. 9. Маркировка транспортного средства для перевозки фенола

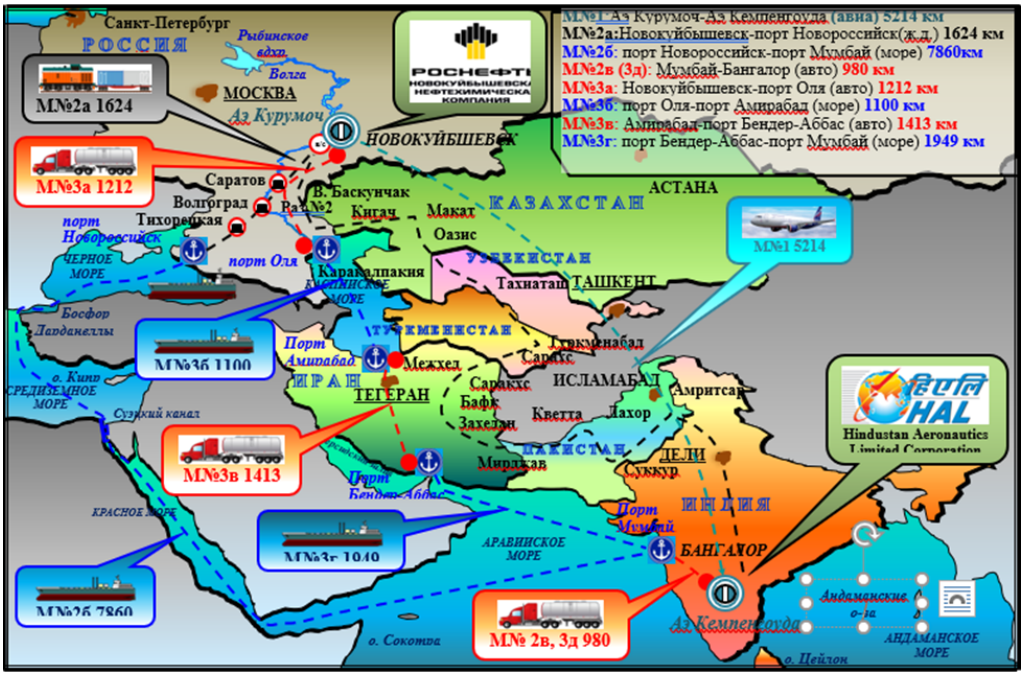


Рис. 10. Общая схема маршрутов

несъемным верхним дном типа 1А1, по 4 шт. на паллете. Расстояние 5214 км.

Маршрут № 2: ж.д. станция Новокуйбышевск – порт Новороссийск в танк-контейнерах типа Т-11 по 2 шт. на железнодорожной платформе модели 13-6953. Расстояние 1624 км. Порт Новороссийск – порт Мумбай на судне типа Ро-Ро в танк-контейнерах Т-11. Расстояние 7860 км. Мумбай – Бангалор перевозка танк-контейнеров Т-11 на полуприцеп-контейнеровозах Krone Box liner с помощью седельный тягача HINO 700 SS. Расстояние 984 км.

Описание маршрута № 3: транспортировка из Новокуйбышевска до порта Оля на полуприцепе-цистерне «Сеспель» с помощью седельный тягача HINO 700 SS. Расстояние 1212 км. Порт Оля – порт Амирабад на судне Ро-Ро. Расстояние 1100 км. Автоперевозка Амирабад – порт Бендер-Аббас на полуприцепе-цистерне «Сеспель». Расстояние 1413 км. Порт Бендер-Аббас – порт Мумбай на судне типа Ро-Ро. Расстояние 1949 км. Порт Мумбай – Бангалор автоцистерной. Расстояние 980 км.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Итоговые стоимость и время доставки по маршрутам [*11-13*]

Маршрут № 1:

Протяженность маршрута – 5080 км (авиа).

Время доставки – 1сут.

Стоимость перевозки – 44 163 882 руб.

Маршрут № 2:

Протяженность маршрута – 1624 км (ж.д.) + 7860 км (море)+984 км (авто) = 10486 км.

Время доставки – 3 сут. (ж.д.) + 3 сут. (море) + 3 сут. (авто) = 16,01 сут.

Стоимость перевозки – 1 799 950,06 руб. (ж.д.) + 5 091 715,87руб. (море) + 1 178 885,40 руб.(авто) = 8 070 551,33 руб.

Маршрут № 3:

Протяженность маршрута – 1212 км (авто) + 1100 км (море) + 1413 км (авто) + 1949 км (море) + 980 км (авто) = 6654км.

Время доставки – 0,85 сут. (авто) + 2,6 сут. (море) + 1 сут. (авто) + 3,6 сут. (море) + 0,7 сут. (авто) = 8,75 сут.

Стоимость перевозки – 2 072 147руб. (авто) + 1 852 870,05 руб. (море) + 3 734 577 руб. (авто) + руб. 2 112 177,93 (море) + 1 922 921 руб. (авто) = 11 694 693 руб.

Результаты сравнения маршрутов по показателям стоимости и времени представлены в табл. 1.

Анализ показателей перевозки на маршрутах

Анализ таблицы показывает, что наиболее дорогостоящим являются маршрут № 1 воздушным транспортом из-за выполнение дополнительных операций при погрузки/разгрузки груза и стоимости топлива.

Таблица 1

Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок

№ маршрута	Вид транспорта	Количество подвижного состава, вид	Расстояние перевозки, км	Время перевозки, сут.	Стоимость, руб./год	Стоимость тонно-километра руб./т км	Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, %
№ 1 (авиа)	Аэропорт Самара (Курумоч) – аэропорт Бангалор (Кемпенгоуда)	Грузовой самолет Boeing747-8F	5080	1	44 163 882	14,49	1,84
№ 2 (ж.д., море, авто)	Ж.д. станция Новокуйбышевск – порт Новороссийск	Ж.д. платформа 15-1603-01 Танк-контейнер Т-11	10468	16,01	8 070 551,33	1,29	0,33
	порт Новороссийск – порт Мумбай	Судно ро-ро «Berkarar»					
	Мумбай – Бангалор	Седельный тягач HINO с полуприцеп контейнеровозом KroneBoxliner					
№ 3 (авто, море, авто, море, авто)	Новокуйбышевск – порт Оля	Седельный тягач HINO и полу-прицеп цистерна «Сеспель»	6654	8,75	11 694 693	2,93	0,48
	порт Оля – порт Амирабад	Судно Sunny					
	Амирабад – порт Бендер-Аббас	Седельный тягач HINO и полу-прицеп цистерна «Сеспель					
	порт Бендер-Аббас – порт Мумбай	Судно ро-ро «Berkarar»					
	порт Мумбай – Бангалор	Седельный тягач HINO и полу-прицеп цистерна «Сеспель					

Наиболее продолжительным является маршрут № 2 ж.д. + морской + автомобильный транспорт. Большую часть времени тратиться на перегрузочные работы.

Смешанная перевозка маршрутом № 3 автомобильный и морским транспортом является оптимальным по времени доставки и по стоимости перевозки.

Если в качестве критерия выбирать минимальное время транспортировки груза, то вариант смешанной перевозки (Новокуйбышевск – порт Оля автомобиль автоцистерна; порт Оля – порт Амирабад на судне Ро-Ро; автоперевозка Амирабад – порт Бендер-Аббас; порт Бендер-Аббас – порт Мумбай; порт Мумбай – Бангалор автоцистерной) по маршруту №3 наиболее подходящий под это условие, потому что фенол данной марки имеет ограниченный срок годности.

Заключение

В данной статье описывается общая характеристика, специфические особенности, сведения об упаковке, способы транспортировки фенола. Также обоснован подвижной состав на автомобильном, воздушном, морском и железнодорожном транспорте. Представлены подробные маршруты для всех видов транспорта.

На первом маршруте перевозка фенола осуществлялась в тарно-бочковой упаковке с помощью самолета. Стоимость перевозки составила 44 163 882 руб., время – 1 сутки.

На втором маршруте смешанная перевозка осуществлялась с использованием танк-контейнера Т-11 из Новокуйбышевска до Бангалора с помощью железнодорожной платформы, полуприцепа-контейнеровоза и грузового судна. Стои-

мость перевозки составила 8 070 551,33руб., время в пути – 16 суток.

На третьем маршруте смешанная перевозка осуществлялась в автоцистернах: на автомобильном транспорте использовался седельный тягач HINO 700 SS, на морском транспорте на судне судне типа Ро-Ро. Стоимость перевозки составила 11 694 693 руб., а время в пути – 8 суток 20 часа. Таким образом, с учетом полученных данных можно сделать вывод о том, что экономичная и относительно быстрая перевозка будет осуществляться на маршруте № 3 автомобильным и морским транспортом.

Библиографический список

1. ГОСТ 23519-93. Фенол синтетический технический. Технические условия. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации 15.04.94, № 2. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. 23 с.

2. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007.

3. Паспорт безопасности фенола. URL: https://www.carlroth.com/medias/SDB-0040-RU-RU.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMjc1NDN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHN (дата обращения: 27.11.2022).

4. Танк-контейнер Т11, 24 000 литров. Общая спецификация. URL: https://www.exsif.ru/wpcontent/uploads/2019/12/specifikaciya.pdf (дата обращения: 27.11.2022).

5. Полуприцеп контейнеровоз Krone Box liner. Общая характеристика. URL: https://krone-gts.ru/products/container-chassis/box-liner/ (дата обращения: 27.11.2022).

6. Железнодорожная платформа для танк-контейнеров модели 13-6953. Общая характеристика. URL: http://www.rvrz.ru/pokupatelyam/katalog-produktsii/novoe-vagonostroenie/platforma-dlya-perevozki-tank-konteynerov-modeli-13-6953/ (дата обращения: 27.11.2022).

7. Цистерна для перевозки фенола. Общая характеристика. URL: http://specneftemash.ru/kislotovozy-sespel/tsisterna-dlya-fenola (дата обращения: 27.11.2022).

8. Boeing 747-8. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_747-8 (дата обращения: 27.11.2022).

9. Бочки стальные сварные и закатные с гофрами на корпусе. URL: https://docs.cntd.ru/document/120001128 (дата обращения: 27.11.2022).

10. ГОСТ 57479-2017 Опасные грузы. Маркировка.

11. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Части 1, 2. М.: ПФ «Красный Пролетарий», 2003 (с изменениями на 31 января 2017 года).

12. Расчет тонно-километров онлайн калькулятор. URL: https://www.center-pss.ru/math/tonno-kilometri.htm (дата обращения: 27.11.2022).

13. Стоимость фенола. URL: https://xn--80aado4arm.xn--p1ai/goods/%D0%A4%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%BB (дата обращения: 27.11.2022).

УДК 656.11

Д. К. Шехавцова*
магистрант
С. В. Уголков*
кандидат военных наук, доцент
В. В. Зива*
ассистент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

АНАЛИЗ МЕР ПО УЛУЧШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В данной статье представлена сводка текущей ситуации в части безопасности дорожного движения в Российской Федерации, а именно аварийности на дорогах и ее причин. Проведен анализ открытых источников по рассматриваемой теме, в частности подробным образом рассмотрены некоторые меры по улучшению безопасности дорожного движения, закрепленные в РФ законодательным актом.
Ключевые слова: *дорожное движение, безопасность транспортных процессов, дорожно-транспортное происшествие, аварийная ситуация, остановочный путь.*

D. K. Shekhavtsova*
Postgraduate Student
S. V. Ugolkov*
PhD, Military, Associate Professor
V. V. Ziva*
Assistant
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ANALYSIS OF MEASURES TO IMPROVE TRAFFIC SAFETY IN RUSSIAN FEDERATION

This article contains a summary of current situation of traffic safety in Russian Federation: accident rate and its reasons. An analysis of opened resources by main topic of the article is carried out. A deep analysis of some measures to improve the traffic safety, that are enshrined in legistation in Russian Federation, is carried out.
Keywords: *traffic, safety of transport processes, traffic accident, emergency, stopping way.*

Введение

В современном мире практически каждый человек на нашей планете ежедневно становится участником дорожного движения. Это происходит по пути из дома на работу, в школу, в магазин и во множестве других случаев. Следовательно, такая тема как безопасность дорожного движения актуальна для большинства людей на планете, в частности, в Российской Федерации.

Основным документом, регламентирующим какую-либо деятельность в сфере безопасности дорожного движения в Российской Федерации, является Федеральный закон №196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» [1].

В [1] приведены основные термины и понятия, применяемые в рамках исследуемой темы:

– дорожное движение – совокупность общественных отношений, возникающих в процессе перемещения людей и грузов с помощью транспортных средств или без таковых в пределах дорог;

– безопасность дорожного движения (БДД) – это состояние данного процесса (дорожного движения), отражающее степень защищенности его участников от дорожно-транспортных происшествий и их последствий;

– дорожно-транспортное происшествие – событие, возникшее в процессе движения по дороге транспортного средства и с его участием, при котором погибли или ранены люди, повреждены транспортные средства, сооружения, грузы либо причинен иной материальный ущерб.

Мероприятия, направленные на повышение БДД в РФ, описаны в федеральной целевой

программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах» [2].

Общая сводка аварийности на дорогах в РФ

Общая сводка аварийности на дорогах в РФ в период с 2015 по 2021 год по данным сервиса stat.gibdd.ru [3] приведена на рис. 1–3.

По приведенной статистике видно, что за 6 лет количество ДТП снизилось на 28%, количество пострадавших в ДТП снизилось на 28%, а количество погибших – на 36%. При этом по данным Росстата [4] количество транспортных средств, принимающих участие в дорожном движении, постоянно растет (рис. 4) – рост составил 11%.

Выявление причин ДТП в РФ

Научный центр безопасности дорожного движения (НЦБДД) [5] ежегодно составляет информационно-справочные материалы о состоянии аварийности в РФ. По данным НЦБДД большинство ДТП происходят вследствие нарушения правил дорожного движения водителями транспортных средств. В 2015–2021 годах доля таких ДТП составляет 85–88%.

Одним из самых распространенных нарушений является нарушение скоростного режима, т. е. превышение разрешенной скорости движения. По данным всемирной организации здравоохранения вплоть по 80% водителей регулярно нарушают скоростной режим. Огромным пробелом российского законодательства в области дорожного движения является отсутствие каких-либо штрафных санкций за превышение скорости не более чем на 20 км/ч.

Превышение скорости оказывает наибольшее влияние на представителей наименее защищенных категорий участников дорожного движения: пешеходов, велосипедистов, мотоциклистов, а в наше время еще и пользователей средств индивидуальной мобильности (моноколеса, электросамокаты и т. п.). Проведено немало исследований на тему влияния скорости транспортного средства на тяжесть последствий для незащищенного участника дорожного движения в случае ДТП. Результаты этих исследований говорят о том, что вероятность смертельного исхода для пешехода в случае наезда на него транспортного средства со скоростью 50 км/ч составляет около 20%, а при скорости 80 км/ч вероятность смертельного исхода возрастает в 3 раза.

Рассмотрим ситуацию, когда водитель заметил перебегающего дорогу пешеход на расстоянии 35–38 м. В среднем время реакции водителя составляет около 1 секунды, после чего водитель начинает экстренное торможение. На рис. 5 приведен примерный расчет скорости столкновения с пешеходом в зависимости от скорости движения легкового автомобиля на момент, когда водитель заметил пешехода.

Как видно на рис. 5, при движении с максимальной разрешенной скоростью (60 км/ч) водитель полностью успевает остановить ТС. А при скорости движения 80 км/ч он успевает замедлиться всего лишь на 18 км/ч до момента столкновения с пешеходом. Последствия этого столкновения могут оказаться фатальными для пешехода.

Увеличение тормозного пути влияет не только на вероятность летального исходя для пешехода в случае наезда на него, но и на вероятность летального исходя для водителя и пассажиров в случае столкновения двух транспортных средств.

Таким образом, превышение допустимой скорости движения – крайне опасное нарушение правил, поэтому особое внимание среди мероприятий, направленных на повышение БДД в РФ, описанных в [3], привлекает оснащение системами автоматического контроля и выявления нарушений Правил дорожного движения улично-дорожной сети городов и иных населенных пунктов, дорог регионального и муниципального значения. Примером такого мероприятия служит установка камер безопасности дорожного движения, фиксирующих нарушение скоростного режима.

Виды камер видеофиксации

Среди всех камер видеофиксиции нарушений ПДД можно выделить три типа:

– переносные – требуют ежедневной установки и настройки;

– стационарные – устанавливаются и настраиваются однократно на какой-либо опоре, после чего работают постоянно в автоматическом режиме без дополнительных действий со стороны человека;

– мобильные – устанавливаются на транспортные средства и фиксируют нарушения правил по ходу их движения.

Одной из самых распространенных камер видеофиксации является система радиолокационного слежения «Стрелка» (рис. 6).

Она представляет собой два железных ящика. Первый содержит доплеровский радар, второй содержит камеру, оснащенную инфракрасным отражателем. Данная система фиксинрует нарушения на расстоянии до 1 км и может кон-

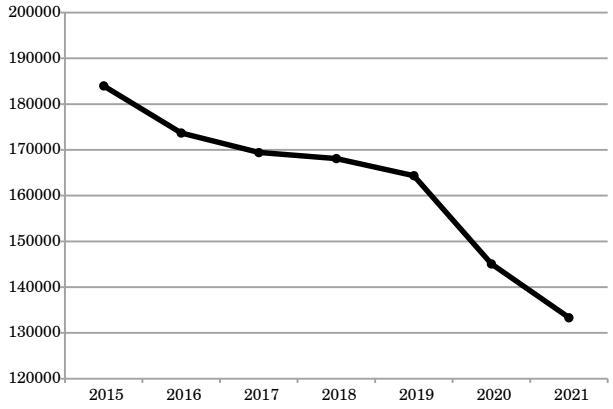


Рис. 1. Количество ДТП, произошедших в РФ в период с 2015 по 2021 год

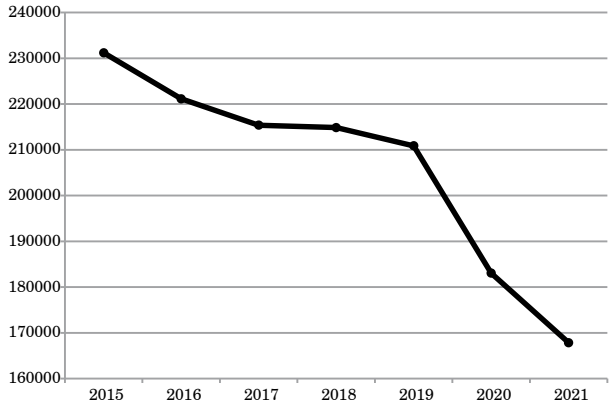


Рис. 2. Количество раненых в ДТП людей в РФ в период с 2015 по 2021 год

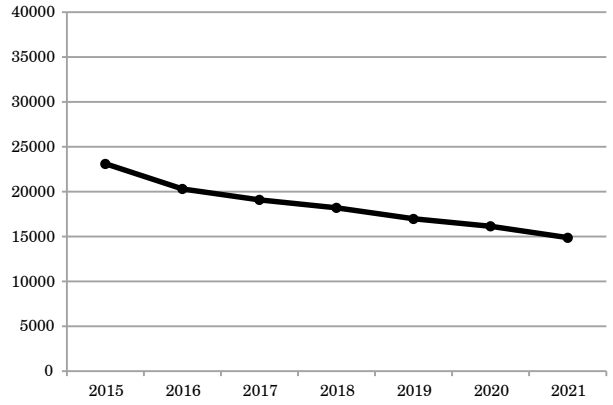


Рис. 3. Количество погибших в ДТП людей в РФ в период с 2015 по 2021 год

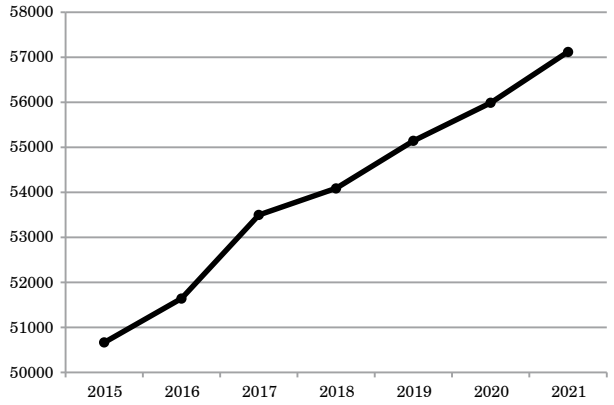


Рис. 4. Количество транспортных средств (грузовых, легковых автомобилей и автобусов) в РФ в период с 2015 по 2021 год

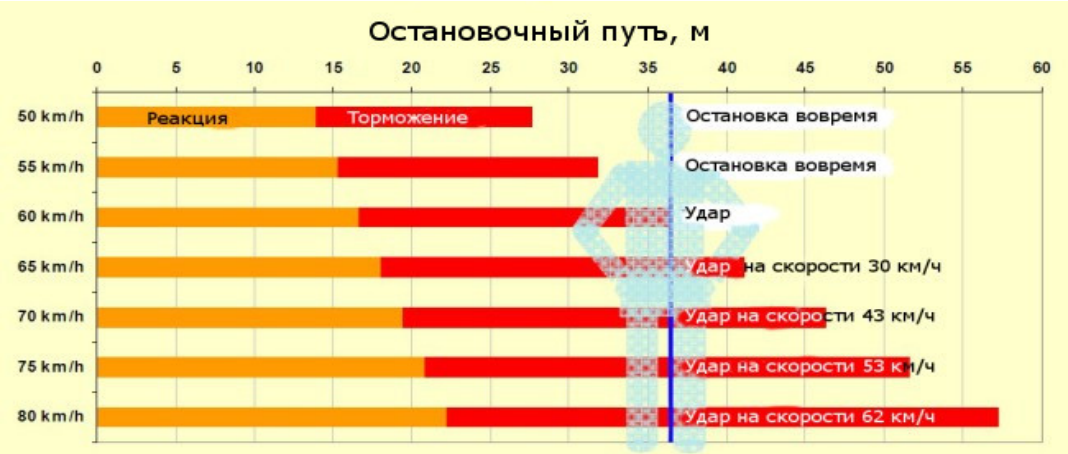


Рис. 5. Зависимость скорости столкновения от скорости движения ТС

тролировать одновременно до пяти полос движения. Захватывает транспортные средства со скоростью движения от 5 до 180 км/ч.

В настоящее время широкое распространение получает комплекс СКАТ производства ООО «Ольвия» [6] (рис. 7.). Это многоцелевой комплекс автоматической видеофиксации нарушений ПДД. Помимо превышения скорости комплекс способен фиксировать и ряд других нарушений. СКАТ распознает автомобили на

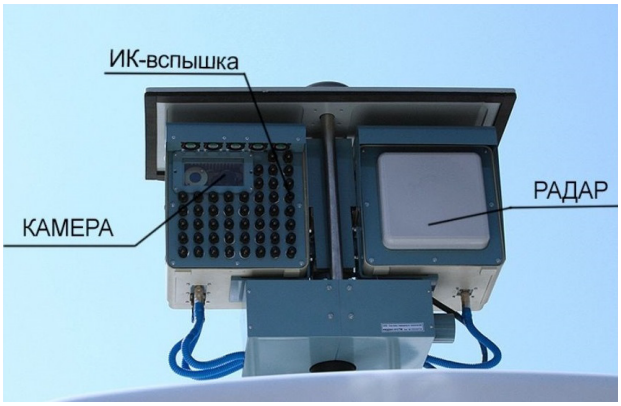


Рис. 6. Камера видеофиксации «Стрелка»

Рис. 7. Камера видеофиксации СКАТ

Рис. 8. Количество камер фотовидеофиксации нарушений ПДД в РФ

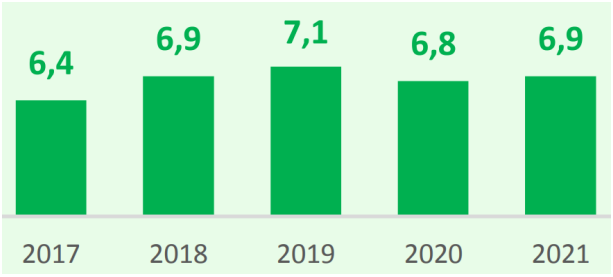


Рис. 9. Количество штрафов в расчете на один комплекс фотовидеофиксации

расстоянии от 5 до 50 м, двигающиеся со скоростью от 5 до 250 км/ч.

Также в наши дни резко увеличилось количество переносных камер видеофиксации, устанавливаемых на крышах автомобилей. Плис таких систем состоит в том, что их установка возможна практически в любом месте в зависимости от дорожной обстановки.

Достигнутые результаты

Согласно Информационноаналитическому обзору НЦБДД о правоприменительной деятельности в области безопасности дорожного движения в 2021 году [7] количество комплексов фотовидеофиксации нарушений правил дорожного движения в период с 2017 по 2021 годы непрерывно растет (рис. 8), при этом количество выявленных нарушений правил в расчете на один комплекс фотовидеофиксации остается примерно на одном уровне (рис. 9).

Абсолютное большинство всех штрафов (около 88%) составляют штрафы за превышение скорости.

Заключение

В рамках настоящей статьи был проведен глубокий анализ различных источников по теме статьи, рассмотрены меры по улучшению БДД, действующие в РФ на государственном уровне. Анализ и проработка собранной статистики (рост количества автомобилей на дорогах, рост количества камер фидеофиксации нарушений ПДД, неизменность показателя количества зафиксированных нарушений, снижение количества ДТП и пострадавших в них) косвенно говорит о том, что меры повышения БДД, установленные в [1] в целом работают и ситуация на дорогах РФ становится безопаснее с каждым годом.

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ от 3 октября 2013 г. № 864 О федеральной целевой программе «Повышение безопасности дорожного движения в 2013–2020 годах.

2. Госавтоинспекция. Показатели состояния безопасности дорожного движения. URL: https://stat.gibdd.ru (дата обращения: 28.10.2022).

3. Федеральный закон от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. От 01.12.2007) О безопасности дорожного движения (принят ГД ФС РФ от 01.11.1995).

4. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru (дата обращения: 28.11.2022).

5. Научный центр безопасности дорожного движения. URL: https://нцбдд.мвд.рф (дата обращения: 12.11.2022).

6. Общество с ограниченной ответственностью «Ольвия». Производитель электроники. URL: https://olvia.ru (дата обращения: 01.11.2022).

7. Информационно-аналитический обзор МВД России. URL: https://media.mvd.ru/files/embed/4491461 (дата обращения: 18.11.2022).

УДК 656.7.022.3 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-300-306**

Е. М. Шишкарева*
магистрант
Н. Н. Майоров*
доктор технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

В статье рассматриваются общие сведения о состоянии авиации общего назначения в Санкт-Петербурге. Реализуется авиамаршрут на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области, проводится анализ нормативно-правовой базы, также дается прогноз развития аэродромной сети и представляются рекомендации по улучшению состояния авиации общего назначения.
Ключевые слова: *авиация общего назначения, воздушное судно, эксплуатант, аэродромная сеть, авиационная транспортная инфраструктура, легкие воздушные суда, сверхлегкие воздушные суда, парк воздушных судов, авиационный учебный центр.*

E. M. Shishkareva*
Postgraduate Student
N. N. Mayorov*
Dr. Sc., Tech., Associate Professor
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OG GENERAL AVIATION IN ST. PETERSBURG

The article discusses general information about the state of general aviation in St. Petersburg. An air route is being implemented on the territory of St. Petersburg and the Leningrad Region, an analysis of the regulatory framework is being carried out, forecasting of the development of the airfield network is also described and recommendations for improving the state of general aviation are presented.
Keywords: *General aviation, aircraft, operator, airfield network, aviation transport infrastructure, light aircraft, ultralight aircraft, aircraft fleet, aviation training center.*

Введение

Авиация общего назначения – один из трех видов гражданской авиации в Российской Федерации. Довольно часто этот термин ошибочно интерпретируется как малая авиация в целом, которая используется везде, где это считается необходимым [1].

ICAO определяет авиацию общего назначения методом исключения, как полет воздушного судна, который не выполняет коммерческие воздушные перевозки и авиаработы.

Работа авиации общего назначения основана на эксплуатации легких и сверхлегких воздушных судов, таких как вертолеты, бизнес-джеты, аэростаты и др.

Интерес к данному виду авиации определяется объективными причинами, связанными с необходимостью развития транспортных структур.

Состояние авиации общего назначения в Санкт-Петербурге

По известным данным на текущий момент в Санкт-Петербурге эксплуатируется 95 единиц авиационной техники, которая относится к авиации общего назначения, но более 61,5% новых воздушных судов производятся за рубежом.

Авиационную деятельность осуществляют 5 юридических и 90 физических лиц. [2]

На рис. 1 представлена подробная структура авиации общего назначения.

На территории Санкт-Петербургской зоны единой системы организации воздушного движения, протяженность которой составляет 300 км, зарегистрировано 13 аэродромов и авиационных площадок, на рис. 2 представлено их местоположение [3].

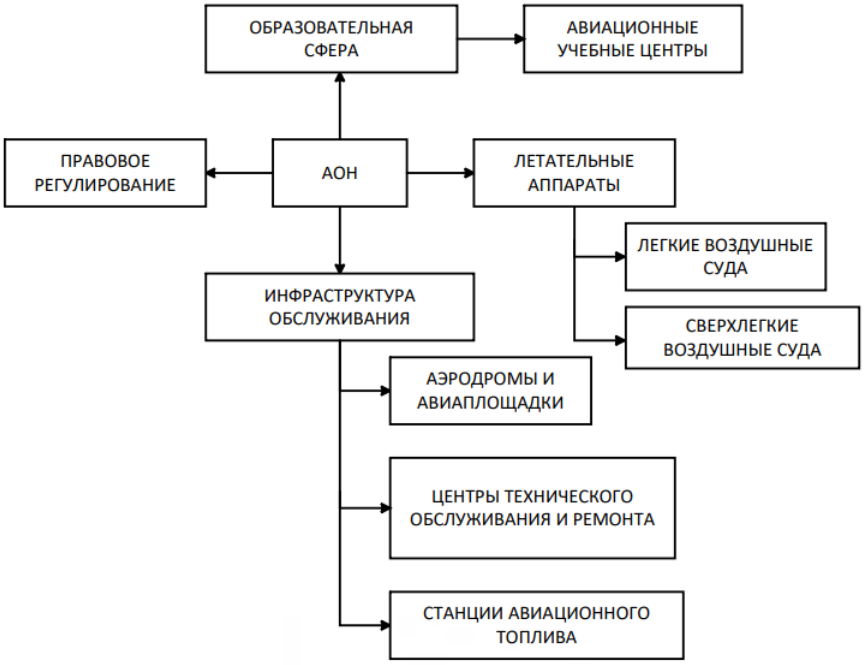


Рис. 1. Структура авиации общего назначения

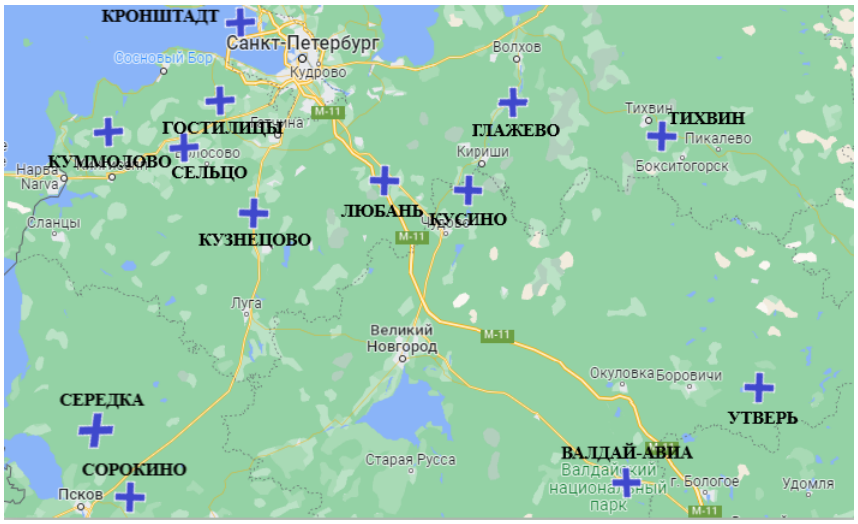


Рис. 2. Местоположение аэродромов и авиационных площадок

Каждый аэродром имеет собственное наименование и личный индекс местоположения. Индекс аэродрома представляет собой четырехбуквенный идентификатор, для гражданской авиации первая буква указателя – «У», индекс посадочных площадок представлен в виде координат.

Ленинградская область имеет обширную территорию, в районах со слабо развитой наземной транспортной сетью и с плохими дорожными условиями, воздушный транспорт может стать отличной альтернативой, при развитии местных авиакомпаний – это быстрый и малозатратный способ обеспечения транспортной связности по сравнению со строительством дорог для наземного транспорта.

На рис. 3 изображены возможные авиамаршруты в пределах Ленинградской области с использованием воздушных судов авиации общего назначения, в табл. 1 приведено показательное сравнение временных затрат по маршруту с эксплуатацией трех основных видов транспорта – железнодорожного со скоростью 75 км/ч, автомобильного со скоростью 65 км/ч и воздушного со скоростью 225 км/ч.

Санкт-Петербург – Выборг – самый короткий маршрут, если сравнивать железнодорожный и

Таблица 1

Временные затраты с использованием разного вида транспорта

№	Город отправки	Город прибытия	Расстояние	Время в пути		
				Вид транспорта		
				Ж/д	Автомобильный	Воздушный
1	Санкт-Петербург	Выборг	132 км	2 ч. 25 мин.	2 ч. 55 мин	25 мин.
2	Санкт-Петербург	Луга	132 км	2 ч. 50 мин.	3 ч. 15 мин.	25 мин.
3	Санкт-Петербург	Подпорожье	280 км	4 ч. 15 мин.	5 ч. 25 мин.	1 ч. 10 мин.
4	Санкт-Петербург	Тихвин	225 км	2 ч.	4 ч. 25 мин.	50 мин.
5	Луга	Выборг	264 км	–	5 ч. 25 мин.	1 ч. 5 мин
6	Подпорожье	Выборг	412 км	–	8 ч. 25 мин.	1 ч. 45 мин.
7	Луга	Подпорожье	409 км	–	8 ч. 20 мин.	1 ч. 43 мин.
8	Луга	Тихвин	307 км	–	6 ч. 15 мин.	1 ч. 17 мин.
9	Тихвин	Выборг	357 км	–	7 ч. 16 мин.	1 ч. 30 мин.

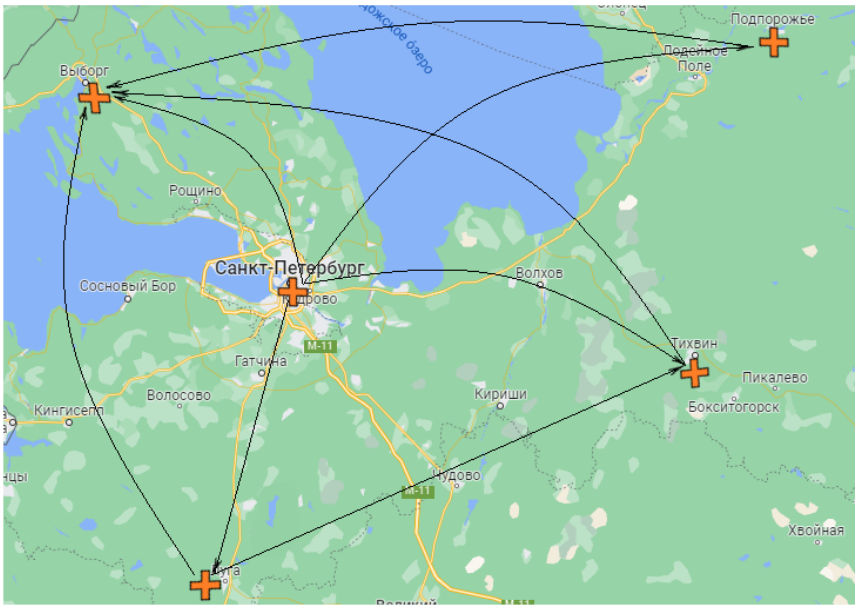


Рис. 3. Реализация авиамаршрутов в Ленинградской области

воздушный транспорт, воздушный в 9 раз быстрее, если сравнивать с автомобильным – в 10,2 раз.

Маршрут Подпорожье – Выборг является самым долговременным, время в полете составляет 1 час 45 минут, используя автомобильный транспорт время в пути займет 8 часов 25 минут. При использовании воздушного транспорта время сократится в 5,7 раз.

Очевидно, что воздушный транспорт опережает по скорости все остальные виды транспорта.

Необходимость развития авиации общего назначения

Авиация общего назначения – важная часть глобальной транспортной системы, дополняющая коммерческую авиацию и другие виды транспорта.

Благородя использованию авиации общего назначения, появляется возможность повысить транспортную связность населенных пунктов Северо-Запада России, в том числе решить проблемы с поиском пострадавших при ЧС и срочной доставкой, при необходимости, в медицинские учреждения.

Кроме того, наблюдается мультипликативный эффект для развития предприятий авиастроения, создания новых рабочих мест и развития инновационных навигационных технологий. Это позволяет шире использовать научный и экономический потенциал Санкт-Петербурга.

Важность авиации общего назначения для экономики основана на частных инвестициях, которые каждое заинтересованное лицо вкладывает в развитие гражданской авиации –

оплачивая летную подготовку и налоги, приобретая или арендуя воздушное судно и место на аэродроме при необходимости, используя воздушное пространство, а также внося средства на техническое облуживание.

Таким образом, с учетом вышеуказанных моментов выделяются средства на развитие авиационной транспортной инфраструктуры, что позволит сократить расходы страны на подготовку частных пилотов, обустройство и содержание аэродромов и авиационных учебных центров.

К сожалению, на данный момент авиация общего назначения не входит в сферу экономических интересов Российской Федерации. Причиной такой ситуации является несовершенство авиационного законодательства.

Государственное регулирование в области авиации общего назначения

Авиацию общего назначения регулируют:

1. Воздушный кодекс РФ.
2. Федеральные авиационные правила.
3. Нормативно-правовые акты Правительства.
4. Указы президента РФ.
5. Международные правовые акты.

На рис. 4 представлена структура исполнительной власти в области авиации общего назначения. Их обязанности на данный момент распределяются следующим образом:

– Министерство транспорта Российской Федерации занимается нормативно-правовым регулированием, связанным с воздушным пространством и аэронавигацией.

– Межгосударственный авиационный комитет в области расследования авиационных происшествий, сертификации и аттестации аэропортов.

– Федеральное агентство воздушного транспорта оказывает услуги и управляет госимуществом в области воздушного транспорта.

– Федеральная служба по надзору в сфере транспорта контролирует воздушное пространство и аэронавигационное обслуживание.

Сегодня не существует единой структуры, которая непосредственно отвечала бы за формирование государственной политики в области развития авиации общего назначения и призвана координировать деятельность всех органов исполнительной власти [4].

Описание метода прогнозирования развития аэродромной сети

Благодаря прогнозированию возможно определить будущее состояние транспортной инфраструктуры.

Прогноз изменения значений одного параметра основан на его известных прошлых значениях, табл. 2 содержит известные данные за период с 2016 по 2020 год [5].

На рис. 5 показано расположение всех аэродромов и вертолетных площадок в Санкт-Петербурге.

Аэродромы, вертолетные площадки и посадочные площадки являются неотъемлемой частью инфраструктуры, без развития которой невозможно улучшить состояние авиации общего назначения. От этого параметра напря-

Рис. 4. Структура исполнительной власти

Таблица 2

Исходные данные для прогнозирования

Год	Количество аэродромов, вертодромов и посадочных площадок
2012	40
2013	44
2014	47
2015	49
2016	53
2017	57
2018	61
2019	64
2020	67

мую зависит расширение парка воздушных судов и формирование транспортной сети.

Число вовлеченных людей и мероприятий увеличивается пропорционально развитию авиации общего назначения.

Для прогнозирования развития аэродромной сети Санкт-Петербурга использовались полиномиальные модели [6].

Для повышения эффективности оперативного управления аэродромной системой возникает необходимость создания системы полиномиальных динамических моделей, которые показывают зависимости функций результатов выходов авиационной системы y_1, y_2, …, y_n от контролируемых входных значений $x_1, x_2, ..., x_n$. При таком подходе полиномиальные модели представляют числовые свойства целевых функций аэродромной системы.

Интерполяция – способ нахождения промежуточных значений величины из уже существующего дискретного набора известных значений. Графически задача интерполяции состоит в том, чтобы построить интерполяционную функцию, которая пересекала бы все узлы интерполяции [7].

Аппроксимация – замена некоторых математических объектов другими, близкими к исходным, это также метод аппроксимации, при котором функция аппроксимации проходит между узлами интерполяции, чтобы найти дополнительные значения, отличные от табличных данных [7].

На основе исследования точности прогноза были получены следующие функции в классе полиномиальных моделей, которые отражают развитие аэродромной сети с точки краткосрочного прогнозирования.

Ни одна из аппроксимирующих функций не обеспечивает точных показателей из-за влияния внешних факторов. С учетом прогноза количество аэродромов, вертолетных площадок и посадочных площадок в Санкт-Петербурге может увеличиться:

– в 2022 году до 73;

– в 2023 году до 76.

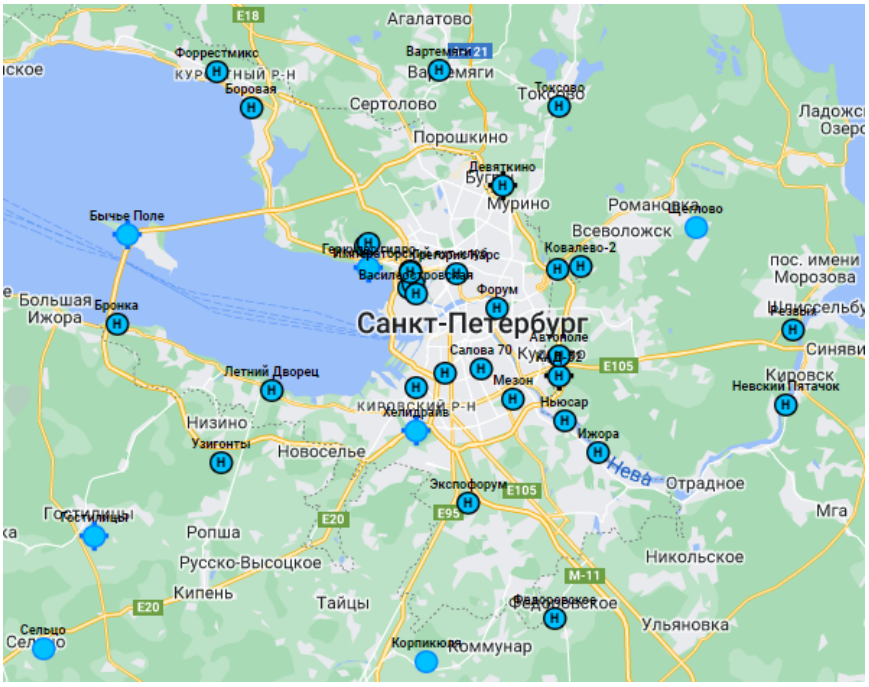


Рис. 5. Расположение аэродромов и вертодромов на территории Санкт-Петербурга

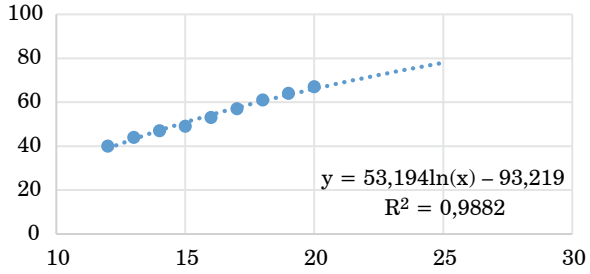


Рис. 6. Логарифмическая аппроксимация

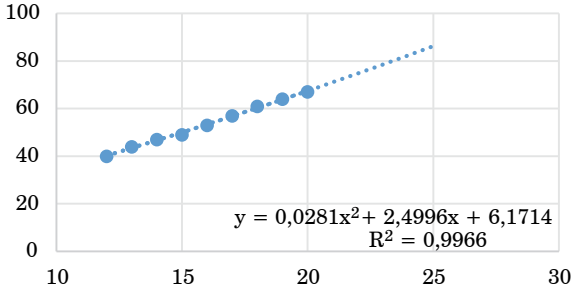


Рис. 7. Полиномиальная аппроксимация (степень 2)

Эти цифры вполне могут соответствовать действительности при постепенном развитии. Исходя из результатов прогноза, можно сделать вывод, что развитие аэродромной сети является эффективным решением.

Предложения по развитию авиации общего назначения

Для развития аэродромной сети нецелесообразно строить новые аэродромы, рациональнее снова ввести в эксплуатацию неиспользуемые.

Для того чтобы определить стоимость восстановления аэродромов, необходимо понимать, что такое полноценная реставрация, какой инфраструктурой он должен быть оснащен и какие документы требуются для использования.

В статье предлагаются аэродромы и вертолетные площадки для реконструкции:

1. Вертолетная площадка спорткомплекса СКА уже находится на стадии обустройства и регистрации аэронавигационного паспорта. Ее эксплуатация благоприятно скажется на спортивных и частных полетах.

2. Вертолетная площадка Ларгус заброшена, но имеет необходимое обустройство, на данный момент ее используют как склад для топлива 100LL и ТС-1. Вертодром располагается на Московском шоссе, его местоположение позволит обеспечить связь с Пушкинским районом.

3. Аэродромы Бурный и Мельниково помогут развить аэродромную сеть на севере Санкт-Петербурга.

Аэродромы малой авиации в России не имеют единой государственной базы, из-за недостатков учета и отсутствия правил об обязательной регистрации. Поэтому необходимо заняться разработкой подобной базы [8].

Для того, чтобы вернуть АОН ее заслуженную ценность, необходимо начать с правового регулирования.

В течение последних лет в ряд Федеральных авиационных правил, таких как ФАП-147 и ФАП-118 были внесены уточнения и правки, которые в будущем скажутся на благоприятном развитии авиации общего назначения [9].

В Санкт-Петербурге и Ленинградской области нет авиационных учебных центров, для того чтобы отучиться на частного пилота или переквалифицироваться на другой тип воздушного судна необходимо на период обучения переехать в ближайший город, где открыт авиационный учебный центр.

Заключение

В статье определяется понятие авиации общего назначения согласно Воздушному кодексу, изучаются проблемы и состояние данной авиации в Санкт-Петербурге.

Также в статье реализуются авиамаршруты в пределах Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В Санкт-Петербургской зоне находится 13 аэродромов.

В результате проведенного прогнозирования, с использованием полиноминальных моделей, количество аэродромов, вертолетных площадок и посадочных площадок в Санкт-Петербурге может увеличиться в 2022 году до 73, в 2023 году – до 76.

После проведенного анализа были выделены предложения по развитию авиации общего назначения.

Можно сделать вывод, что авиация общего назначения на сегодняшний момент имеет много проблем, но с постепенным и непрерывным развитием существует большая вероятность значительно улучшить ее состояние.

Библиографический список

1. Воздушный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 8 июня 2020 года) (редакция, действующая с 1 января 2021 года) Кодекс РФ от 19.03.1997 N60-ФЗ – М.: 64 с.

2. Распоряжения правительства Санкт-Петербурга. URL: https://docs.cntd.ru/document/456013660 (дата обращения: 21.11.22).

3. Аэродромы и авиационные площадки Санкт-Петербургской зоны. URL: http://flarf.ru/airfields_and_aviaposylki/sankt-peterburgskaya-zona/ (дата обращения: 21.11.22).

4. Государственное регулирование авиации общего назначения. URL: https://kavdjaradze.ru/Sravnitelniy-analiticheskiy-obozr-aon/ (дата обращения: 21.11.22).

5. *Ельчанинов А. Ф.* Авиация общего назначения: проблемы и перспективы // Развитие авиации общего назначения. СПб., 2012. С. 6-9.

6. *Майоров Н. Н*, Фетисов В. А. Практические задачи моделирования транспортных систем. СПб.: ГУАП, 2012. 185 с.

7. *Заикин А. Д.* Методы интерполяции и аппроксимации. ПиТФ НГТУ, 2009. 11 с.

8. *Куклев Е. А.* Развитие авиации общего назначения: проблемы и перспективы // Объемы производства воздушных судов. СПб., 2012. 4 с.

9. Федеральные авиационные правила. Утверждены приказом Минтранса России от 12 января 2022 года № 10. М.: 62 с.

УДК 528.7 **DOI: 10.31799/978-5-8088-1819-4-2023-4-1-307-310**

В. В. Ялтыхов*
кандидат технических наук, доцент
К. И. Маркович*
кандидат технических наук
**Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой*

ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРОВ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ПРИ АЭРОСЪЕМКЕ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все шире используются в геодезических работах для получения информации о трехмерных характеристиках местности. До недавнего времени для планово-высотного обоснования аэросъемки с беспилотных аппаратов использовались наземные опорные точки (опознаки). Установка и координирование опознаков занимает достаточно продолжительное время и зависит от размера снимаемой территории. Применение приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), интегрированных в БПЛА для определения координат центров фотографирования, позволяет уменьшить количество наземных опознаков. В настоящей работе представлены результаты обработки измерений с приемника ГНСС, встроенного в БПЛА и наземной базовой станции. Апробация производилась на 2 объектах с площадью 20 и 300 гектар. Вычисление положения ГНСС-приемника, установленного на борту БПЛА, производилось в постобработке от базовой станции, расположенной на удалении от 0,5 до 4 км от места съемки.
Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты, аэросъемка, глобальная навигационная спутниковая система, координаты центров фотографирования.*

V. V. YAltyhov*
PhD, Tech., Associate Professor
K. I. Markovich*
PhD, Tech.
**Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*

FEATURES OF OBTAINING COORDINATES OF PHOTOGRAPHING CENTERS WHEN PERFORMING AERIAL PHOTOGRAPHY FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Unmanned aerial vehicles are increasingly being used in geodetic works to obtain information about the three-dimensional characteristics of the terrain. Until recently, ground reference points were used for the planned high-altitude justification of aerial photography from unmanned aerial vehicles. The installation and coordination of reference points takes quite a long time and depends on the size of the territory being filmed. The use of receivers of the global navigation satellite system integrated into unmanned aerial vehicles to determine the coordinates of the photographing centers makes it possible to reduce the number of ground reference points. This paper presents the results of processing measurements from the receiver of the global navigation satellite system installed in the unmanned aerial vehicles and the ground base station. The experiment was carried out at 2 sites, with an area of 20 and 300 hectares. The position of the receiver was calculated in post-processing relative to the base station located at a distance of 0.5 to 4 km from the shooting location.
Keywords: *unmanned aerial vehicles, aerial photography, global navigation satellite system, coordinates of photography centers.*

В последние десятилетия беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко применяются в научных и практических областях в качестве альтернативной платформы дистанционного зондирования и как новый источник фотограмметрических данных. Появление беспилотных технологий позволило повысить не только точность и эффективность, но и доступность съемки. Однако, вместе с их преимуществами, маловысотные и малогабаритные БПЛА-системы имеют некоторые ограничения, такие как продолжительность полета и сбор данных на больших площадях. При этом следует отметить, что беспилотные решения все же обладают собственной спецификой, и специалистам необходимо учитывать ряд факторов, чтобы выбрать оптимальное решение для выполнения работ.

Фотограмметрическая обработка с использованием БПЛА основана на обработке перекрывающихся аэроснимков, используемых для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ортофотопланов. При обработке применяются следующие методы: structure-from-motion (SfM) и MultiView Stereopsis (MVS). SfM – это фотограмметрический способ создания 3D (трехмерных) моделей объекта из перекрывающихся 2D-фотографий, сделанных из разных точек пространства с различной ориентацей, чтобы восстановить сфотографированную сцену [1]. Для SfM метода необходимы аэроснимки с большим перекрытием (например, 80–90%). MVS – это метод, который используется для сгущения полученного облака точек из SfM.

Для SfM метода не требуется информация о положении камер или опорные точки, потому что положение, ориентация и геометрия реконструируются с использованием автоматического сопоставления признаков на нескольких изображениях [2]. Однако полученная модель будет иметь произвольный масштаб и ориентацию. Абсолютная ориентация полученной модели может быть получена двумя способами: используя наземные опорные точки или координаты центров фотографирования. Также возможна комбинация этих способов.

Геопривязка фотограмметрических моделей с использованием опорных точек, полученных наземными методами, обеспечивает надежное позиционирование [3], однако количество и пространственное распределение опорных точек оказывают существенное влияние на точность модели. Кроме того, использование опорных точек позволяет выполнить самокалибровку камеры и уменьшает величину остаточных ошибок за дисторсию объектива.

Определение координат центров фотографирования с помощью ГНСС приемников (т. е. прямая геопривязка на основе ГНСС), интегрированная в БПЛА-системы является альтернативным методом внешнего ориентирования фотограмметрических моделей по опорным точкам [4]. Использование метода прямой географической привязки дает возможность уменьшить количество опорных точек. Большинство распространенных платформ БПЛА имеют ГНСС приемник, который может использоваться для добавления позиционной информации к файлу изображения. Тем не менее точность одночастотных ГНСС приемников на платформах БПЛА находится в диапазоне нескольких метров. Следовательно, при создании высокоточных моделей позиционной информации, полученной от таких ГНСС приемников, недостаточно. В настоящее время многочастотные ГНСС приемники позволяют определять параметры положения камеры на сантиметровом уровне. Такая высокоточная прямая географическая привязка может быть выполнена в реальном времени (RTK) или в режиме постобработки (PPK). Для применения дифференциального решения ГНСС, требуется два приемника: наземная базовая станция с известным местоположением в качестве исходной точки отсчета и подвижный приемник, перемещающийся между точками. Когда система RTK установлена на БПЛА она используется для объединения и сопоставления данных о местоположении, полученных с базовой станции, с корректировкой местоположения камеры БПЛА в режиме реального времени. При корректном использовании данной технологии возможно определять координаты местоположения камеры на сантиметровом уровне точности, которые в полете записываются в метаданные аэрофотоснимков.

Беспилотные решения RTK особенно востребованы, поскольку они обеспечивают результаты в режиме реального времени и не требуют постобработки. Но для качественного выполнения задач необходима постоянная и хорошая связь на протяжении всей полетной миссии. В полете для режима RTK требуется два типа каналов передачи данных: один между пультом дистанционного управления и базовой станцией, а другой между пультом дистанционного управления и БПЛА. Нередко приходится работать в таких условиях, где стабильная передача данных затруднена. Поэтому, чтобы снизить риск потери связи на каналах передачи данных, хорошей альтернативой для работ такого вида может стать технология PPK, особенно если планируется выполнять работы в отдаленных районах с плохим качеством связи в сети.

PPK позволяет выполнить коррекцию данных не во время полета, а после него – в режиме постобработки. Сами данные ГНСС измерений обычно хранятся на борту беспилотного летательного аппарата. После завершения полета эти данные объединяются с данными базовой станции в специальном программном обеспечении, установленном на персональном компьютере (ПК). Это дает пользователям больше гибкости и надежности. Например, если в полете возникают проблемы на линии передачи данных в реальном времени, точность результатов все равно можно поддерживать в режиме PPK.

Для целей исследования использовалась съемка с БПЛА с ГНСС приемником в PPK режиме. Площадь участка местности составляла 20 га, высота съемки 70 м, пространственное

разрешение 2 см, количество снимков – 364, скорость полета – 6 м/с. Схема маршрутов приведена на рис. 1. Базовая станция располагалась на территории снимаемого участка. Частота записи измерений составляла 5 Гц.

В качестве БПЛА использовался DJI Phantom 4 PRO. В настоящее время он занимает значительную долю рынка среди БПЛА вертолетного типа. Квадрокоптер оснащен камерой с пространственным разрешением 20 мегапикселей на гиростабилизирующем трехосевом подвесе. Интегрированная плата глобальной навигационной спутниковой системой на борту создает временную метку события при срабатывании затвора камеры в середине времени экспозиции. Тем самым в постобработке данных спутниковых наблюдений можно получить высокоточные координаты центров фотографирования.

Обработка ГНСС измерений методом PPK была выполнена в программном обеспечении Trimble Business Center (TBC), после конвертации файлов измерений с базовой станции и приемника, установленного на борту Phantom 4 PRO, в общеобменный формат RINEX. Данный программный продукт позволяет, после вычисления данных траектории, выполнить расчет координат точек, для которых указаны «временные метки» различными методами интерполирования (линейный, квадратический и кубический). Далее, полученные координаты перевычислялись в систему координат объекта.

Для оценки возможности применения альтернативных программных продуктов при обработке ГНСС измерений методом PPK был использован программный пакет RTKLib, который распространяется бесплатно по лицензии GNU GPL v3 и публикуется с исходным кодом. Он поддерживает стандартные алгоритмы позиционирования и различные режимы позиционирования как для реального времени, так и для постобработки.

В последнее время появились online сервисы для обработки данных с БПЛА методом PPK. Одним из таких сервисов является TeoboxBot. Для обработки PPK в TeoboxBot нужно конвертировать координаты точек в необходимые системы координат и в общеобменный формат RINEX. В работе выполнена обработка ГНСС измерений и в TeoboxBot. Результаты обработки приведены в табл. 1. Как видно из данных табл. 1, разности координат, полученных в результате обработки в разных программных продуктах, не превышают 2 см и находятся в пределах средних квадратических погрешностей (СКП) определения координат.

Для дальнейших исследований в качестве БПЛА использовался Геоскан 201 – многофункциональное беспилотное воздушное судно, разработанное российской компанией «Геоскан», с фотокамерой Sony RX1RII (объектив 35 мм, полнокадровая матрица и разрешением 42,4 Мп).

Съемка с БПЛА Геоскан 201 выполнялась для участка местности площадью 3 км^2, пространственное разрешение составило 3 см, высота полета 230 м, количество снимков 1141, скорость полета ≈ 20 м/с. Схема маршрутов приведена на рис. 2. Базовая станция располагалась на расстоянии 4 км от снимаемого участка.

Обработка ГНСС измерений методом PPK была выполнена аналогично первому примеру в Trimble Business Center, RTKLib и TeoboxBot. Результаты обработки приведены в табл. 2. Как видно из данных табл. 2, разности координат, полученных в результате обработки в разных

Таблица 1

Разности координат, полученных при обработке ГНСС измерений в Trimble Business Center, RTKLib и TeoboxBot для аэросъемки с Phantom 4 PRO

Разности координат	TeoboxBot – Trimble Business Center			RTKLib – Trimble Business Center		
	Δx, м	Δy, м	ΔH, м	Δx, м	Δy, м	ΔH, м
Максимальная положительная разность, м	0,010	0,013	0,003	0,012	0,015	0,014
Максимальная отрицательная разность, м	–0,003	–0,018	–0,016	–0,006	–0,023	–0,019
Среднее значение разностей, м	0,005	–0,005	–0,005	0,005	–0,004	–0,004

Таблица 2

Разности координат, полученных при обработке ГНСС измерений в Trimble Business Center, RTKLib и TeoboxBot для аэросъемки с Геоскан 201

Разности координат	TeoboxBot – Trimble Business Center			RTKLib – Trimble Business Center		
	Δx, м	Δy, м	ΔH, м	Δx, м	Δy, м	ΔH, м
Максимальная положительная разность, м	0,034	0,008	0,031	0,038	0,022	–0,046
Максимальная отрицательная разность, м	–0,021	–0,021	–0,046	–0,032	–0,026	–0,073
Среднее значение разностей, м	0,005	–0,007	–0,010	0,005	–0,004	–0,007

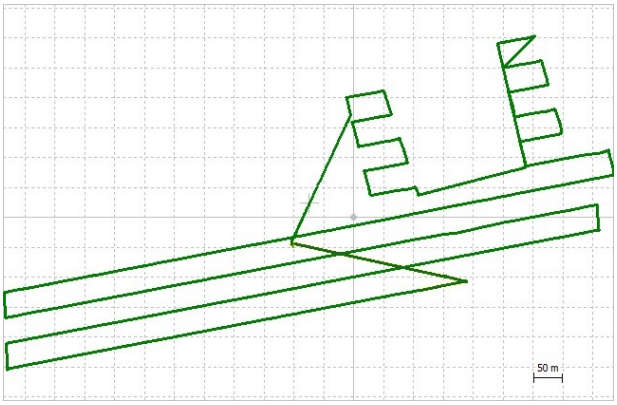


Рис. 1. Схема маршрутов DJI Phantom 4

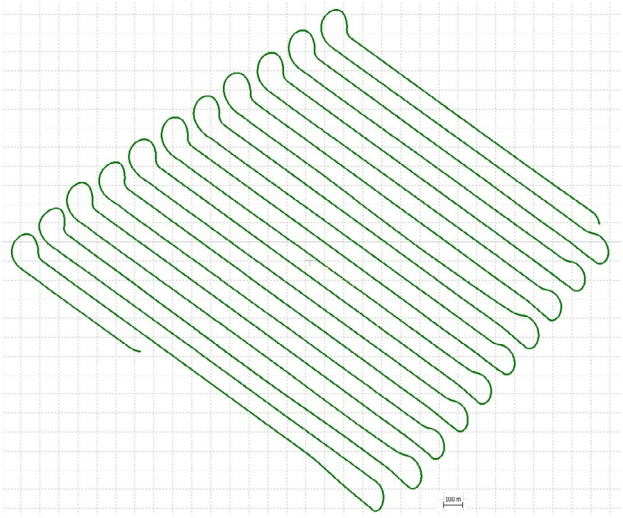


Рис. 2. Схема маршрутов Геоскан 201

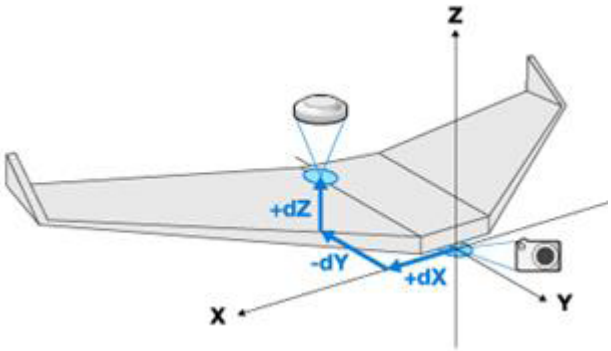


Рис. 3. Схема редуцирования координат фазового центра ГНСС антенны к центру фотографирования

программных продуктах, значительно больше, чем для первого участка аэросъемки. Это можно объяснить разными методами интерполирования по траектории (квадратичная интерполяция в Trimble Business Center и линейная в RTKLib и TeoboxBot) и более высокой скоростью БПЛА.

В рассмотренных выше программных продуктах мы получаем координаты фазового центра антенны ГНСС приемника, установленного на борту беспилотного летательного аппарата. Для приведения координат к центрам фотографирования камеры необходимо ввести смещение между камерой и фазовым центром антенны ГНСС (рис. 3).

Заключение

Результаты обработки ГНСС измерений методом PPK при выполнении аэросъемки с БПЛА позволяют сделать следующие выводы:

– Бесплатный программный пакет RTKLib и онлайн-приложение TeoboxBot для обработки данных с БПЛА методом PPK дают практически идентичные результаты по сравнению с коммерческими программными продуктами, однако обладают меньшим функционалом и являются более сложными при настройке параметров обработки.

– В зависимости от точности требуемых результатов, возможно повысить точность конечных продуктов, увеличивая плотность наземных точек (опознаков).

– Программное обеспечение для фотограмметрической обработки данных с БПЛА должно иметь функцию редуцирования координат фазового центра антенны к оптическому центру камеры.

Библиографический список

1. *Shervais K.* Structure from Motion, Introductory Guide. UNAVCO, 2015. 18 p.

2. *Westoby M. J.* et al. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012. P. 300–314.

3. ГКИНП (ОНТА) 02-…-03. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. Мн.: БЕЛНИЦЗЕМ, 2003. 78 с.

4. ГОСТ Р 59328–2021. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2021. 45с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аграновский Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – применение современных информационных технологий.
E-mail: a_agranovskii@mail.ru

Андронов Сергей Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – имитационное моделирование, искусственный интеллект.
E-mail: andronov_00@mail.ru

Аристов Андрей Алексеевич
аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – ориентация и навигация малых космических аппаратов, оптико-электронные методы.
E-mail: aristandrey@mail.ru

Афанасьева Анастасия Дмитриевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: a.d.afanasyeva@mail.ru

Беляков Владислав Андреевич
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: belyakovvladik@yandex.ru

Бирюков Борис Леонтьевич
старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – анализ и синтез измерительных и управляющих систем.
E-mail: collega.k@yandex.ru

Богданова Софья Александровна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: sof.bogdanowa1@gmail.com

Бойцова Ольга Ивановна
научный сотрудник ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации.
Область научных интересов – байесовские методы, теория вероятности.
E-mail: boitsovm.@mail.ru

Варкентин Данил Дмитриевич
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: danil98wark@gimail.com

Гайдук Елена Александровна
студент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование транспортных процессов, эксплуатация беспилотных авиационных систем.
E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

Голенко Антон Константинович
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – микропроцессорная техника, системы с искусственным интеллектом.
E-mail: golenkotoxa@gmail.com

Головцов Дмитрий Львович
кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование цепей поставок, принятие управленческих решений.
E-mail: Kaf16@list.ru

Горелова Анастасия Алексеевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – организация доставки грузов при помощи БАС.
E-mail: Nastikgor166@gmail.com

Горних Владислав Игоревич
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка информации, управление воздушным движением.
E-mail: v.gornix@yandex.ru

Денин Вячеслав Михайлович
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – изучение беспилотных двигателей.
E-mail: Clava227@yandex.ru

Добровольская Ангелина Александровна
ассистент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование транспортных процессов, эксплуатация беспилотных авиационных систем.
E-mail: angd999@gmail.com

Елкина Дарья Андреевна
студент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – математическое моделирование в логистике.
E-mail: darya.elkina.01@mail.ru

Ерофеевская Полина Николаевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: erofeevskaipn30122000@yandex.ru

Завьялов Павел Олегович
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – групповое управление беспилотниками.
E-mail: pav1498@mail.ru

Зеленцова Валерия Валерьевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: zelentsowa.valeria@yandex.ru

Зива Владислав Витальевич
ассистент кафедры биотехнических систем и технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы, биотехнические системы.
E-mail: ziva.vladislav@gmail.com

Зубков Святослав Иванович
начальник лаборатории ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации.
Область научных интересов – байесовские методы, математическая статистика.
E-mail: swyat2007@yandex.ru

Иванов Юрий Павлович
доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка измерительной информации приборного оборудования ЛА, исследование процессов контроля и диагностики технического состояния измерительных приборов, оценка безопасности полета ЛА на основе финитно-временной и спектрально-финитной методологии представления сигналов и обработки информации.
E-mail: upi@mail.ru

Исаев Юрий Алевтинович
младший научный сотрудник ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации.
Область научных интересов – математическое моделирование, метрология.
E-mail: yuri.isv@gmail.com

Казаков Даниил Андреевич
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – разработка системы синтеза речи.
E-mail: daniilkazakov27@mail.ru

Калакутская Дарья Викторовна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: kaapron@mail.ru

Каргина Екатерина Сергеевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: fuks5599@gmail.com

Княжский Александр Юрьевич
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка информации, управление воздушным движением.
E-mail: knjagskij@mail.ru

Коврегин Валерий Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – радиолокация, навигация, комплексная обработка информации.
E-mail: kovregin@mail.ru

Коврегина Галина Михайловна
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – радиолокация, навигация, комплексная обработка информации.
E-mail: g_kovregina@mail.ru

Козлов Артем Андреевич
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – категорийный менеджмент, машинное обучение.
E-mail: kozlov.artiom@yandex.ru

Козюличев Илья Тимофеевич
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: erumoog@gmail.com

Корельский Максим Павлович
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – надежность и безопасность авионики.
E-mail: fhtvjdu@gmail.com

Костин Антон Сергеевич
ассистент кафедры системного анализа и логистики, заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем Инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – беспилотные авиационные системы.
E-mail: anton13258@mail.ru

Красненков Никита Сергеевич
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка измерительной информации.
E-mail: nikita.krasnenkov@gmail.com

Майоров Николай Николаевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов и систем.
E-mail: nnm@guap.ru

Малаханов Роман Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – микропроцессорная техника, системы с искусственным интеллектом.
E-mail: malahanov@mail.ru

Маликова Татьяна Егоровна
доктор технических наук, доцент кафедры теории и устройства судна.
Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.
Область научных интересов – логистика в сфере транспорта.
E-mail: Malikova@msun.ru

Мальков Игорь Геннадьевич
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: igor.malkov.0003@yandex.ru

Маркович Кирилл Игоревич
кандидат технических наук, заведующий кафедрой геодезии и геоинформационных систем.
Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой.

Область научных интересов – применение геодезических методов при решении геодинамических задач.
E-mail: k.markovich@psu.by

Низяева Юлия Денисовна
аспирант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление процессами перевозок.
E-mail: yuliyan5@yandex.ru

Никитина Кристина Олеговна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: kristina_nikitina1530@mail.ru

Панкова Яна Игоревна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: pankova_yana99@mail.ru

Перлюк Владимир Владимирович
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – алгоритмы и принципы группировки малых космических аппаратов.
E-mail: perlvv@mail.ru

Пиль Эдуард Анатольевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: epyle@rambler.ru

Прокофьева Марина Сергеевна
аспирант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – имитационное моделирование, искусственный интеллект.
E-mail: m4riprokofjeva@yandex.ru

Радочинская Анжела Жановна
аспирант кафедры теории и устройства судна.
Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.
Область научных интересов – логистика в сфере транспорта.
E-mail: Radochinskaia@msun.ru

Ротов Артем Павлович
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка информации, управление воздушным движением.
E-mail: rotoffff@yandex.ru

Рубинов Владислав Валерьевич
аспирант, инженер лаборатории транспортной логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – транспортная логистика, управление цепями поставок.
E-mail: vvr1071995@mail.ru

Сабанов Андрей Сергеевич
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – микропроцессорная техника, аналого-цифровые преобразователи.
E-mail: sabanov2099@gmail.com

Сафина Галина Леонидовна
заведующий кафедрой фундаментального образования.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
Область научных интересов – математическое моделирование, дифференциальные уравнения, численные методы.
E-mail: safinagl@mgsu.ru

Семенов Дмитрий Николаевич
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка измерительной информации.
E-mail: snn_63@mail.ru

Сигина Татьяна Романовна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: tanyasigina@yandex.ru

Слободчиков Николай Александрович
кандидат военных наук, профессор кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: kola_slob@mail.ru

Соловьева Екатерина Евгеньевна
старший преподаватель кафедры теории и устройства судна.
Морской государственный университет им. адмирала Г. И. Невельского, г. Владивосток.
Область научных интересов – логистика в сфере транспорта.
E-mail: soloveva.ee@dgtru.ru

Сорокина Анастасия Викторовна
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – обработка измерительной информации.
E-mail: Anastasiya_sorokina7@mail.ru

Суетина Анна Васильевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: suetina_an@mail.ru

Сумманен Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: 89215728754@mail.ru

Сучкова Мария Юрьевна
директор центра сопровождения научной деятельности.
Санкт-Петербургский государственный экономический университет.
Область научных интересов – оценка качества проектной деятельности.
E-mail: sychkova95@mail.ru

Уварова Анастасия Андреевна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: Lovedealer007@mail.ru

Уголков Сергей Вячеславович
кандидат военных наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов и систем, интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: uglkvserg@mail.ru

Фоминов Никита Иванович
магистрант университета ИТМО;
ведущий инженер.
ООО «Софтвер Лабс».
Область научных интересов – надежность и безопасность авионики.
E-mail: nifominov@yandex.ru

Фуфаева Ольга Викторовна
научный сотрудник ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Министерства обороны Российской Федерации.
Область научных интересов – математическое моделирование, метрология.
E-mail: fufaeva_ov@mail.ru

Хайруллин Рустам Зиннатулович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник НИУ «Московский государственный строительный университет».
ФГБУ «Главный научный метрологический центр» Минобороны России.
Область научных интересов – математическое моделирование, метрология, механика, управление.
E-mail: zrkzrk@list.ru

Ху Сяоян
профессор кафедры систем наведения и автоматического управления.
Шэньянский политехнический университет (КНР).
Область научных интересов – исследование автоматических систем наведения и управления летательными аппаратами.
E-mail: Xiaoyang_hu@163.com

Черпакова Мария Павловна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: Cherpakova.mariya@mail.ru

Шехавцова Дарья Константиновна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов, интеллектуальные транспортные системы.
E-mail: shekhavtsova99@mail.ru

Шишкарева Екатерина Максимовна
магистрант кафедры системного анализа и логистики.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
E-mail: timoneat@mail.ru

Язвенко Максим Романович
инженер лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование транспортных процессов и систем.
E-mail: maksim-yazvenko@yandex.ru

Ялтыхов Вадим Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры геодезии и геоинформационных систем.
Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой.
Область научных интересов – фотограмметрия, инженерная геодезия.
E-mail: v.yaltyhov@psu.by

СОДЕРЖАНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ... **3**

АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ... **5**

Бирюков Л. Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ В АЛГОРИТМАХ АДАПТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СИГНАЛОВ ... 5

Бирюков Л. Б., Сорокина В. А. АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРОВЕРКОЙ КАЧЕСТВА НАСТРОЙКИ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ ... 11

Горних И. В., Княжский Ю. А. УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА АВИАЦИОННЫХ КОНФЛИКТОВ ЗА СЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ПЛАНОВЫХ 4D-ТРАЕКТОРИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ВО ВРЕМЕНИ ... 16

Иванов П. Ю. СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ АПОСТЕРИОРНОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ НЕВЫХОДА СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА ЗА ДОПУСТИМЫЕ ГРАНИЦЫ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ ... 21

Иванов П. Ю., Красненков С. Н., Семенов Н. Д. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИНИТНО-ВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ С ОБРАТНОЙ И БЕЗ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ... 30

Иванов П. Ю., Семенов Н. Д., Красненков С. Н., Сорокина В. А. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА И ВИРТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ... 36

Казаков А. Д., Малаханов Н. Р. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ ДЛЯ КОДИРОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА ... 42

Коврегин Н. В., Коврегина М. Г. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ СБЛИЖЕНИЯ/УДАЛЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО НЕОДНОЗНАЧНЫМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЭХО-СИГНАЛА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЯ ... 47

Корельский П. М., Фоминов И. Н. АНАЛИЗ СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ARINC-429, ПРИВОДЯЩИХ К ИСКАЖЕНИЮ ВЫДАВАЕМОЙ СПСВ ИНФОРМАЦИИ ... 54

Малаханов Н. Р., Голенко К. А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕКТОРОВ ТЕКСТА НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ... 60

Перлюк В. В., Аристов А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ ГРУППЫ МИКРОСПУТНИКОВ ... 64

Ротов П. А., Княжский Ю. А. ВНЕДРЕНИЕ СРЕДСТВ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ В ТРЕНАЖЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ... 72

Сабанов С. А., Малаханов Н. Р. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ... 77

Ху Сяоян, Перлюк В. В. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМИ РУЛЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ... 81

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИСТИКА ... **97**

Аграновский В. А. ОСОБЕННОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ В ЛОГИСТИКЕ ... 97

Андронов А. С., Прокофьева С. М. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В СИСТЕМАХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ... 102

Афанасьева Д. А., Уголков В. С. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕВОЗОК ОПАСНЫХ ГРУЗОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В ФИНЛЯНДИЮ ВОЗДУШНЫМ ТРАНСПОРТОМ ... 110

Беляков А. В., Пиль А. Э. ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИТОРСКОЙ КОМПАНИИ 121

Богданова А. С., Уголков В. С. МЕРОПРИЯТИЯ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МЕТОДОВ ЭВАКУАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ..... 125

Варкентин Д. Д., Уголков В. С. РАЗВИТИЕ МЕТРОПОЛИТЕНА В КРАСНОСЕЛЬСКОМ РАЙОНЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА..... 131

Гайдук А. Е., Добровольская А. А. ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОБЪЕКТАХ ТРАНСПОРТА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ 137

Головцов Л. Д., Сучкова Ю. М. СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЛОГИСТИЧЕСКИХ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ..... 143

Денин М. В., Костин С. А. НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ОБЛАСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ 146

Елкина А. Д., Добровольская А. А. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПАССАЖИРОВ В ТРАНСПОРТНОМ ТЕРМИНАЛЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРАФОВ 156

Ерофеевская Н. П., Уголков В. С. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ДОРОЖНОГО БИТУМА ИЗ ЯРОСЛАВЛЯ (РФ) В СОФИЮ (БОЛГАРИЯ)..... 160

Зеленцова В. В., Слободчиков А. Н. СЕРВИС «МОБИЛЬНОСТЬ КАК УСЛУГА» – ОДИН ИЗ ПРОГРЕССИВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ..... 167

Калакутская В. Д., Уголков В. С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЭРОПОРТОВ ПУЛКОВО И ВНУКОВО 174

Каргина С. Е., Уголков В. С. ВЫБОР МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ 181

Козлов А. А., Андронов А. С. ТИПИЗАЦИЯ МАГАЗИНОВ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 189

Костин С. А., Горелова А. А. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ ПРИ ПОМОЩИ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ КВАДРОКОПТЕРА ... 198

Костин С. А., Завьялов О. П. АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛАСТИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КВАДРОКОПТЕРАМИ НА ОСНОВЕ РОССИЙСКОГО ИНДЕКСА НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ И БАЗЫ ДАННЫХ SCOPUS..... 204

Костин С. А., Майоров Н. Н., Язвенко Р. М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОСТАВКИ ГРУЗОВ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ В ГРАНИЦАХ РАЙОНА ГОРОДА ... 211

Маликова Е. Т., Соловьева Е. Е., Радочинская Ж. А. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ПОГРУЗЧИКА НА МЕХАНИЗИРОВАННОМ КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ..... 220

Низяева Д. Ю., Слободчиков А. Н. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУКИ ПО ВОПРОСУ ТРАНСПОРТНО-ЭКСПЕДИЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ 225

Никитина О. К., Сумманен В. А. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КОПЕНГАГЕН..... 228

Панкова И. Я., Уголков В. С. АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ В ОБЛАСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК В МЕГАПОЛИСЕ НА ОСНОВЕ РИНЦ И БАЗЫ ДАННЫХ SCOPUS..... 234

Пиль А. Э., Козюличев Т. И. РАЗРАБОТКА МАРШРУТА ДОСТАВКИ ПАССАЖИРОВ В КАМПУС СПБГУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУННОГО ТРАНСПОРТА..... 240

Пиль А. Э., Мальков Г. И. РАЗРАБОТКА КРУГОВОГО МАРШРУТА НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА НА МАГНИТНОЙ ПОДУШКЕ ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА..... 245

Рубинов В. В. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ С ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ 249

Сигина Р. Т., Уголков В. С. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ИММУНОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КАЛИНИНГРАД..... 254

Слободчиков А. Н. ПРОБЛЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ОТПРАВОК ГРУЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ 261

Суетина В. А., Сумманен В. А. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ АЦЕТОНА ИЗ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В КАЛИНИНГРАД 266

Уварова А. А., Уголков В. С. ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ИЗ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ ИЗ ПЕТРОЗАВОДСКА (РФ) В ЗОЛИНГЕН (ФРГ) 273

Фуфаева В. О., Исаев А. Ю. К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДЕГРАДАЦИИ И ОТКАЗОВ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ 278

Фуфаева В. О., Хайруллин З. Р., Сафина Л. Г. К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДРЕЙФА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ 282

Хайруллин З. Р., Зубков И. С., Бойцова И. О. ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ СПУСКЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АТМОСФЕРЕ 285

Черпакова П. М., Уголков В. С. ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ФЕНОЛА ИЗ НОВОКУЙБЫШЕВСКА (РФ) В БАНГАЛОР (ИНДИЯ) 288

Шехавцова К. Д., Уголков В. С., Зива В. В. АНАЛИЗ МЕР ПО УЛУЧШЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 295

Шишкарева М. Е., Майоров Н. Н. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВИАЦИИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ 300

Ялтыхов В. В., Маркович К. И. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРОВ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ ПРИ АЭРОСЪЕМКЕ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА 307

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ 311

Научное издание

АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Четвертая Международная научная конференция
4–21 апреля 2023 г.

Часть 1

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1819-4

Ответственный за выпуск:
В. В. Рубинов, В. Е. Таратун

Редакторская подготовка *Е. В. Лазаревой*
Компьютерная верстка *С. Б. Мацапуры*

Подписано к печати 24.03.2023. Дата выхода в свет: 03.04.2023. Формат 60x84 1/8.
Усл. печ. л. 37,2. Уч.-изд. л. 36,7. Тираж 150 экз. Заказ № 73.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно