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

*Посвящается*
*Всемирному дню космонавтики и авиации*

# АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## Третья Международная научная конференция 14–22 апреля 2022 г.

Сборник докладов

ГУАП
Санкт-Петербург
2022

УДК 001.8
ББК 34.9
А99

А99 Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Третья Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2022 г.): сб. докл. – СПб.: ГУАП, 2022. – 273 с.
ISBN 978-5-8088-1688-6
DOI: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3

В апреле 2022 года в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения состоится Третья Международная научная конференция «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», посвященная 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 приглашенных специалистов организаций. 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, магистров 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

Члены 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

ISBN 978-5-8088-1688-6
DOI: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022

# ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

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

Данная Международная научная конференция в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения является крайне важным событием в календаре специалистов авиационно-космической отрасли как Санкт-Петербурга, так и других городов мира. Международная научная конференция приурочена ко Всемирному дню авиации и космонавтики.

Аэрокосмическая отрасль является одной из самых наукоемких сфер. В данной отрасли сегодня проводятся критические исследования, которые призваны ответить на современные вопросы общества. Мы с вами видим, как быстро меняется сфера космических исследований. Космические полеты сегодня не просто решают конкретные исследовательские задачи, но и направлены уже на расширение границ, доступных человечеству. Сегодня мы видим формирование новых амбициозных идей, которые будут успешно реализованы в ближайшем будущем человеком в космосе. Однако для решения амбициозных задач необходимы квалифицированные кадры, подготовленные в университетской среде. Для решения поставленных задач уже сегодня требуется реализация элементов опережающей подготовки кадров, подготовки в рамках компетенций «FutureSkills». Для воплощения этой задачи в августе 2021 года Санкт-Петербург в лице ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения» (на правах национального центра компетенций FutureSkills), Министерства науки и высшего образования РФ, АНО «Агентства развития профессионального мастерства (Ворлдскиллс Россия)» запустил проект Университет FutureSkills, который ориентирован на масштабные и инновационные преобразования в системе высшего профессионального образования. Одним из результатов программы является обновление образовательных программ высшего образования с учетом актуального и перспективного запроса рынка труда, запросов аэрокосмической и приборостроительной отраслей. К примеру, данные задачи достигнуты для таких компетенций, как «Инженерия космических систем», «Эксплуатация беспилотных авиационных систем».

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

Международная научная конференция включает четыре секции, каждая из которых посвящена актуальным исследованиям, проводимым как на предприятиях, так и в Институте аэрокосмических приборов и систем ГУАП 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.

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

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

*Ректор ГУАП,*
*д-р экон. наук, профессор Ю. А. Антохина*

# АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

## АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

**УДК 681.5**

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

# ОЦЕНИВАНИЕ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

*Рассматриваются алгоритмы оценивания марковских процессов в условиях параметрической неопределенности их вероятностных характеристик, в частности, коэффициента диффузии. В алгоритмах оценивания используется локальная гауссовская аппроксимация апостериорной плотности вероятности. Работоспособность алгоритмов проверяется при помощи компьютерного моделирования.*
***Ключевые слова:*** *марковские процессы, вероятностные характеристики, коэффициент диффузии, гауссовская аппроксимация, апостериорная плотность вероятности.*

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

# ESTIMATION OF MARKOV'S PROCESSES WHEN PARAMETERS OF PROBABILITY DISTRIBUTION ARE UNKNOWN

*Algorithms of Markov's processes estimation in the case of parametric uncertainty of their probability characteristics, in particular of diffusion coefficient are considered. Local Gauss approximation of a posterior probability density is used. Efficiency of the algorithms is tested by computer simulation.*
***Keywords:*** *Markov's processes, probability characteristics, diffusion coefficient, Gauss approximation, a posterior probability density.*

При синтезе систем обработки результатов измерений, а именно систем оценивания сигналов часто возникают трудности, вызванные тем, что априорные характеристики входных процессов известны неточно либо они могут изменяться не полностью известным заранее образом в реальных условиях работы системы. Степень априорной неопределенности может быть различной. Наиболее трудным для работы системы оценивания является случай с непараметрической априорной неопределенностью, когда заранее не известны не только параметры законов распределения процессов, но и вид самих законов распределения. Методы обработки сигналов в условиях непараметрической априорной неопределенности существуют и применяются, но по эффективности они уступают алгоритмам, построенным исходя из только параметрической неопределенности. Поэтому, если существует вызывающая доверие информация (предположение) о свойствах входных процессов, то с практической точки зрения, то есть подразумевая необходимость практической реализации системы оценивания сигналов, допустимо решать задачу построения системы, ограничившись рассмотрением параметрической неопределенности характеристик сигналов.

Существуют различные методы оценивания в условиях априорной неопределенности, например, такие как метод максимального правдоподобия, минимаксный метод, адаптивный байесовский подход и др. Эти методы требуют различного объема априорной информации относительно характеристик входных процессов и имеют различные ограничения. Если реше-

ние задачи обработки измерений строить в рамках марковской теории оценивания сигналов (при условии допустимости является наиболее рациональным выбором), то способ преодоление параметрической априорной неопределенности следует согласовывать с этим выбранным основным методом оценивания.

Известны несколько разновидностей (модификаций) стандартных алгоритмов оценивания марковских процессов в условиях параметрической априорной неопределенности. Теоретически наибольшую эффективность должны показывать алгоритмы на основе оценивания расширенного вектора параметров [1]. Согласно данному подходу набор параметров β, характеризующих априорную неопределенность входных процессов, включается наряду с основными оцениваемыми параметрами $x$ в состав расширенного оцениваемого вектора

$$x_{\text{р}} = \begin{bmatrix} x \\ \beta \end{bmatrix},$$

где $x$ – вектор основных информационных параметров; β – вектор параметров, вводимый для учета априорной неопределенности. Если предположить, что дополнительные параметры β не изменяются во времени либо изменяются, но могут быть представлены в виде компонент марковского процесса, то расширенный вектор в целом также является векторным марковским процессом, значит, для его оценивания применимы обычные методы оценивания марковских процессов.

Как известно [1]–[3], несмотря на то, что формально алгоритм оценивания марковских процессов полностью определяется решением уравнения Стратоновича, само решение для этого уравнения в частных производных далеко не всегда может быть получено в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, то есть в наиболее подходящем для практического применения виде.

Наиболее распространенным приемом, применяемым для сведения уравнения Стратоновича к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, является использование гауссовской аппроксимации для апостериорной плотности вероятности (АПВ) оцениваемого вектора. Во многих случаях алгоритмы оценивания на основе гауссовской аппроксимации оказываются работоспособными и показывают хорошую эффективность. Однако в случае оценивания расширенного вектора состояния в задаче с априорной неопределенностью данные алгоритмы могу оказаться неработоспособными.

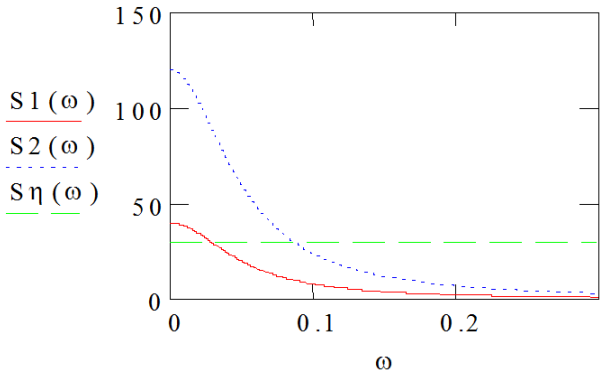



*Рис. 1. Спектральные плотности входных процессов*

Рассмотрим задачу оценивания марковского процесса $x(t)$ первого порядка, задаваемого уравнением

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

где α – параметр, характеризующий ширину спектра процесса $x(t)$; $\xi(t)$ – формирующий белый гауссовский шум с интенсивностью $N_\xi$. Процесс $x(t)$ наблюдается на фоне помехи:

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

где $y(t)$ – наблюдаемый сигнал; $\eta(t)$ – помеха в виде белого гауссовского шума с интенсивностью $N_\eta$. Интенсивность формирующего шума считается априорно неизвестной. На рис. 1 показаны спектральные плотности шума $\eta(t)$ и процесса $x(t)$ для двух значений параметра $N_\xi$.

Параметр $N_\xi$ включается в расширенный оцениваемый вектор

$$x_{\text{р}} = \begin{bmatrix} x \\ N_\xi \end{bmatrix}.$$

Для того чтобы построить алгоритм оценивания $x_{\text{р}}$ на основе гауссовской аппрксимации АПВ, запишем модель двухкомпонентного марковского процесса $x_{\text{р}}(t)$ в векторной форме:

$$\frac{\mathrm{d}x_{\text{р}}(t)}{\mathrm{d}t} = \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t} \\ \dfrac{\mathrm{d}N_{\hat{\text{i}}}(t)}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha x(t) + \alpha\xi(t) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнения алгоритма оценивания вектора $x_{\text{р}}(t)$ на основе локальной гауссовской аппроксимации АПВ имеют вид:

$$\frac{\mathrm{d}\hat{x}_{\mathrm{p}}(t)}{\mathrm{d}t}=\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}\hat{x}(t)}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{N}_{\mathrm{i}}(t)}{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}=$$

$$=g(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})+R(t)\frac{\partial f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})}{\partial\hat{x}_{\mathrm{p}}}N_{\eta}^{-1}\left[y(t)-f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})\right],$$

$$\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t}=\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}R_{11}(t)}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}R_{12}(t)}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}R_{21}(t)}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}R_{22}(t)}{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix}\alpha^2\widehat{N}_{\mathrm{i}}(t) & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}+\frac{\partial g(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})}{\partial\hat{x}_{\mathrm{p}}}R(t)+R(t)\left[\frac{\partial g(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})}{\partial\hat{x}_{\mathrm{p}}}\right]^{\mathrm{T}}-$$

$$-R(t)\left[\frac{\partial f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})}{\partial\hat{x}_{\mathrm{p}}}\right]^{\mathrm{T}}N_{\eta}^{-1}\left[\frac{\partial f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})}{\partial\hat{x}_{\mathrm{p}}}\right]R(t);$$

$$g(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})=\begin{bmatrix}-\alpha\hat{x}(t)\\ 0\end{bmatrix},f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})=\begin{bmatrix}\hat{x}(t) & 0\end{bmatrix},\quad(1)$$

где $\hat{x}(t)$, $\widehat{N}_{\mathrm{i}}(t)$ – оценки параметров; $g(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})$, $f(t,\hat{x}_{\mathrm{p}})$ – заданные вектор-функции; $R(t)$ – апостериорная ковариационная матрица вектора $x_{\mathrm{p}}$.

Результаты моделирования алгоритма (1) представлены на рис. 2, 3. Величины по осям ординат безразмерные. Ось абсцисс – дискретное время. Рис. 2 соответствует случаю, когда начальное значение оценки параметра $N_{\xi}$ равно 40 при истинном значении также 40, то есть рассогласование отсутствует. Расчетное значение установившегося значения апостериорной дисперсии $D_{11}$ информационного параметра $x$ равно 0,36 при выборочном значении по реализации – 0,31; оценка параметра $N_{\xi}$ отличается от истинного значения менее чем на 1 %. Таким образом, оценки параметров близки к оптимальным. Рис. 3 соответствует случаю, когда начальное значение оценки параметра $N_{\xi}$, по-прежнему равное 40, а истинное значение равно 400. Из графических зависимостей видно, что оценка параметра $N_{\xi}$ сначала колеблется около начального значения, но далее не двигается в направлении к истинному значению.

Оценка информационного параметра $x$ имеет повышенную динамическую составляющую ошибки (расчетное значение установившегося значения апостериорной дисперсии $D_{11}$ инфор-

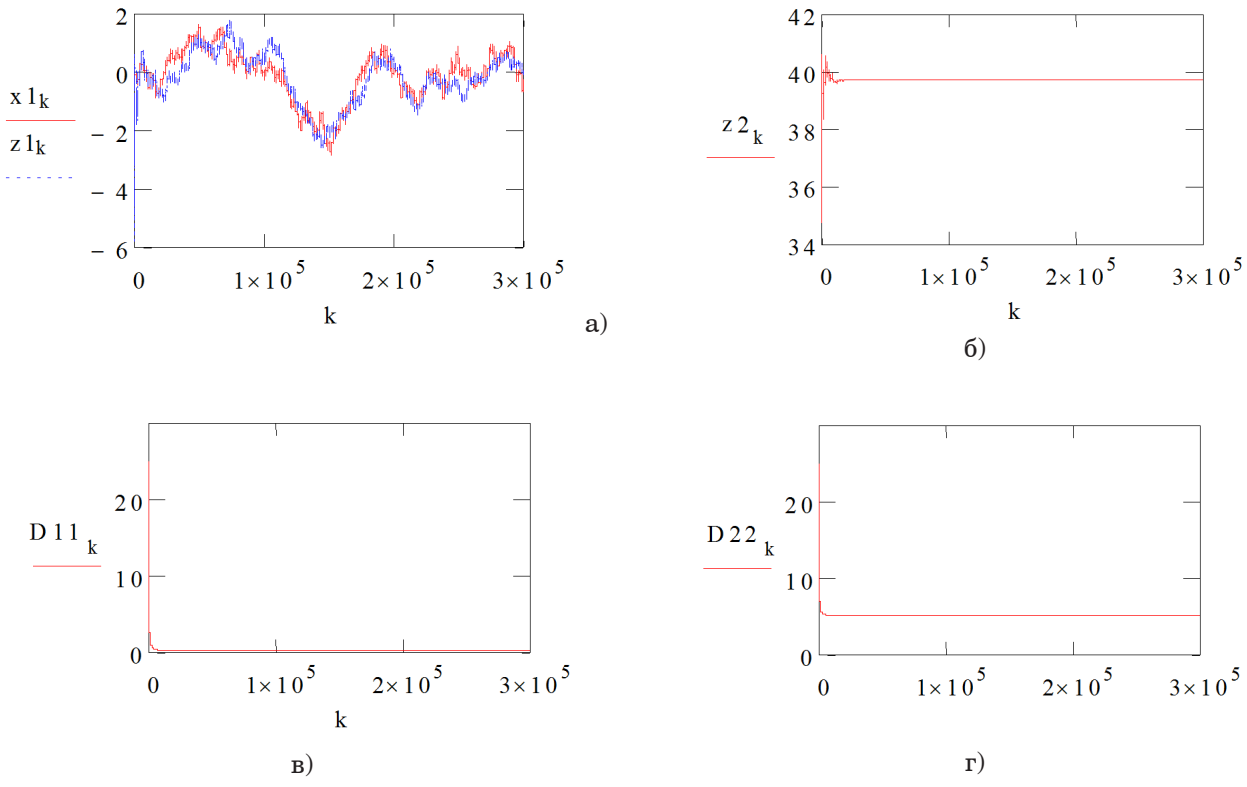



*Рис. 2. Результаты моделирования алгоритма (1) при $N_{\xi}$=40: а, б – оценки параметров; в, г – апостериорные дисперсии*

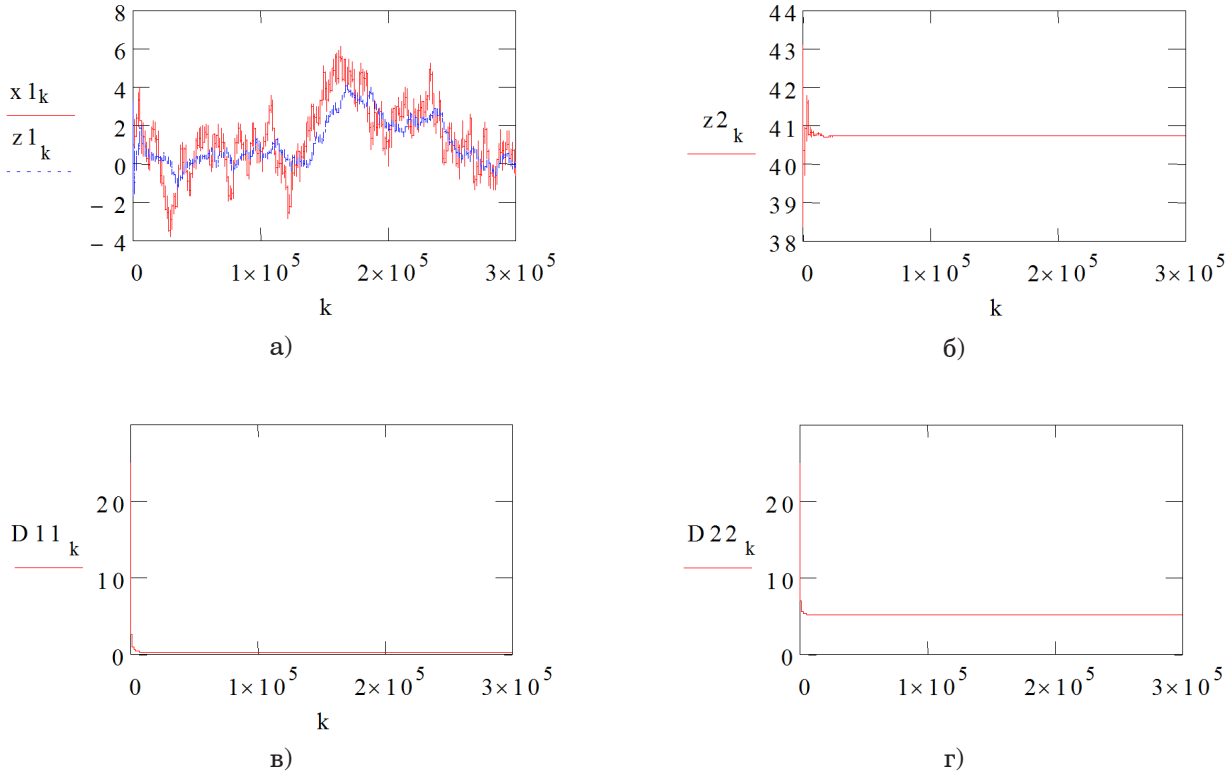



*Рис. 3. Результаты моделирования алгоритма (1) при $N_\xi = 400$: а, б – оценки параметров; в, г – апостериорные дисперсии*

мационного параметра $x$ равно 1,3 при выборочном значении по реализации – 3,3. При других комбинациях начальных значений оценки и истинного значений параметра $N_\xi$ характер зависимостей сохраняется, то есть оценка параметра $N_\xi$ не сходится к истинному значению. Выборочная апостериорная дисперсия $D_{22}$ параметра $N_\xi$, хотя и убывает быстро, но останавливается на слишком большом значении 5,9, причем практически одинаково на рис. 3 и 4, что не соответствует истинным зависимостям.

В [1], [3] приводятся похожие результаты для данного алгоритма оценивания. Можно было бы, конечно, попытаться применить другие модификации алгоритма с различными вариантами гауссовской аппроксимации АПВ, но результат вовсе не гарантирован. Вместе с тем оказывается, что задачу можно решить, изменив формальную ее постановку, оставив суть неизменной. Далее рассматривается способ учета априорной неопределенности интенсивности формирующего шума при помощи введения соответствующего параметра β не в коэффициент диффузии процесса $x(t)$, а в модель наблюдаемого процесса

$$y(t) = \beta x(t) + \eta(t).$$

Тогда в модели для $x_p$ формально $N_\xi$ поменяется на β и алгоритм оценивания на основе гауссовской аппроксимации АПВ примет вид:

$$\frac{d\hat{x}_p(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{x}(t)}{dt} \\ \frac{d\hat{\beta}(t)}{dt} \end{bmatrix} =$$

$$= g(t,\hat{x}_p) + R(t)\frac{\partial f(t,\hat{x}_p)}{\partial \hat{x}_p} N_\eta^{-1}\left[y(t) - f(t,\hat{x}_p)\right],$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dR_{11}(t)}{dt} & \frac{dR_{12}(t)}{dt} \\ \frac{dR_{21}(t)}{dt} & \frac{dR_{22}(t)}{dt} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} \alpha^2 N_\text{i} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\partial g(t,\hat{x}_p)}{\partial \hat{x}_p} R(t) + R(t)\left[\frac{\partial g(t,\hat{x}_p)}{\partial \hat{x}_p}\right]^T -$$

$$-R(t)\left[\frac{\partial f(t,\hat{x}_p)}{\partial \hat{x}_p}\right]^T N_\eta^{-1}\left[\frac{\partial f(t,\hat{x}_p)}{\partial \hat{x}_p}\right] R(t),$$

$$g(t,\hat{x}_p) = \begin{bmatrix} -\alpha\hat{x}(t) \\ 0 \end{bmatrix}, f(t,\hat{x}_p) = \begin{bmatrix} \hat{\beta}(t)\hat{x}(t) & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

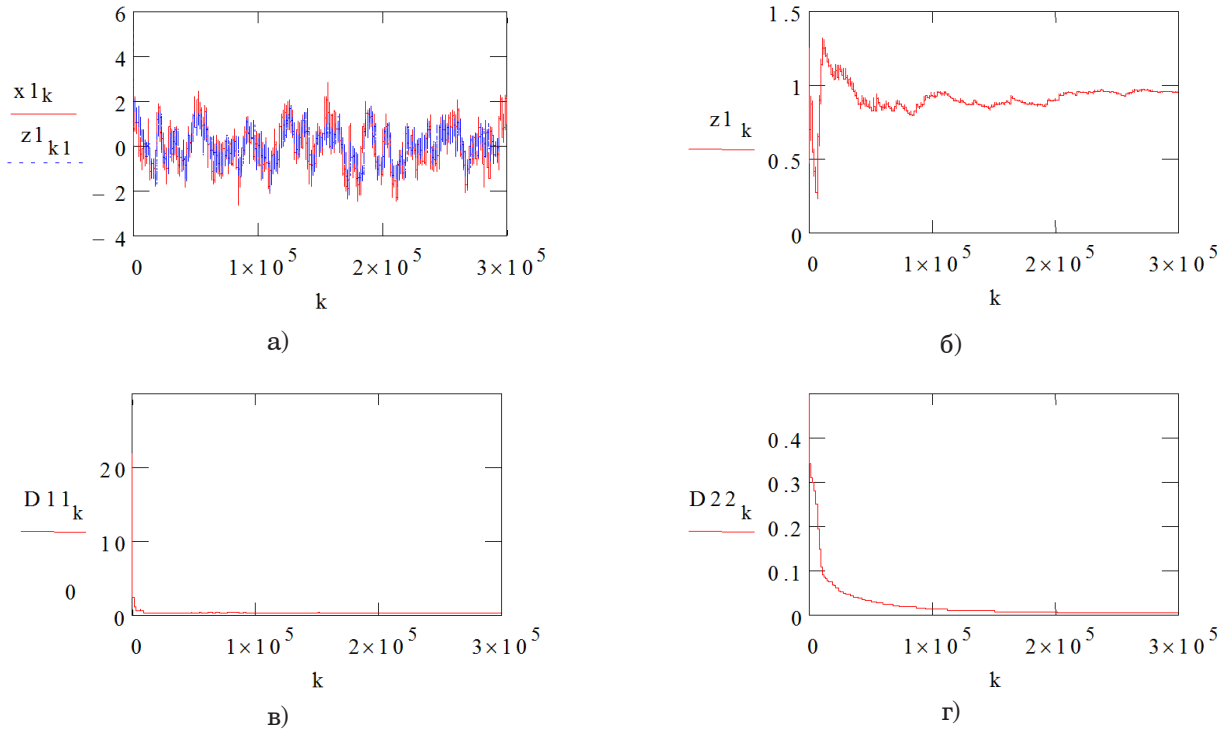



*Рис. 4. Результаты моделирования алгоритма (2) при β = 1: а, б – оценки параметров; в, г – апостериорные дисперсии*

Результаты моделирования алгоритма приведены на рис. 4, 5. Шаг по времени увеличен в 10 раз. Рис. 4 соответствует случаю, когда начальное значение оценки параметра β равно 1 при истинном значении также 1, то есть когда нет рассогласования по интенсивности форми-

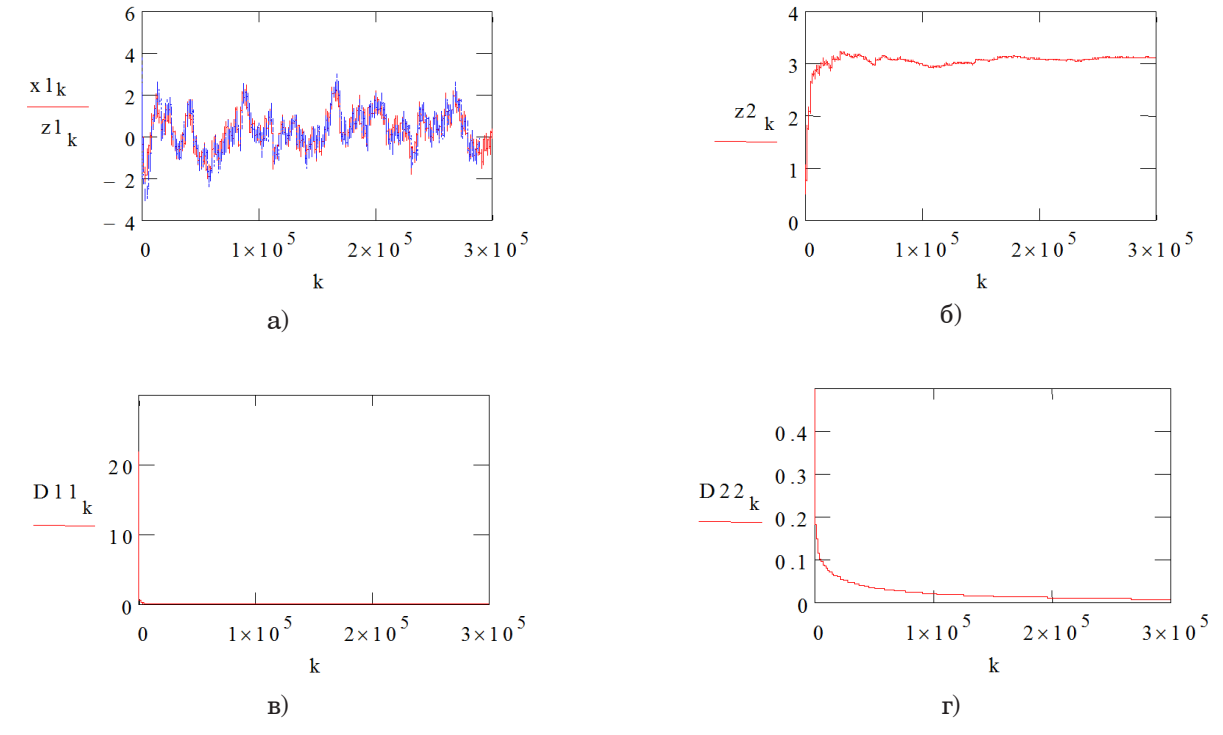



*Рис. 5. Результаты моделирования алгоритма (2) при* $\beta=\sqrt{10}$ *: а, б – оценки параметров; в, г – апостериорные дисперсии*

рующего шума. Расчетное значение установившегося значения апостериорной дисперсии $D_{11}$ информационного параметра $x$ равно 0,36, то есть как на рис. 2 при близком значении для реализации – 0,32; оценка параметра β вначале имеет разброс, но с течением времени разброс уменьшается и установившаяся оценка отличается от истинного значения менее чем на 5 %. Поэтому оценка параметра $x$ близка к оптимальной.

Рис. 5 соответствует случаю, когда начальное значение оценки параметра β по-прежнему равно 1, в то время как истинное значение равно $\sqrt{10}$ ($N_\xi$ в 10 раз больше, то есть равен 400). Из графических зависимостей видно, что оценка параметра β от начального значения уверенно стремится к истинному значению, причем относительный разброс оценки меньше чем в первом случае. Оценка информационного параметра $x$ при этом приближается к оптимальной (расчетное и выборочное значения апостериорной дисперсии $D_{11}$ информационного параметра $x$ соответственно равны 0,14 и 0,13). Апостериорные дисперсии $D_{11}$ и $D_{22}$ с течением времени уменьшаются, при этом $D_{22}$ снижается до малых значений, правильно отражая установление параметра вблизи истинного значения. Оценивание основного информационного параметра, а это есть главное назначение системы, также значительно улучшилось и приближается по дисперсии ошибки к значениям, соответствующим точно настроенной системе. Устойчивость алгоритма сохраняется при разбросе параметра β в диапазоне ±10 дб и более (при изменении интенсивности формирующего шума в 10 раз и более как в большую, так и меньшую стороны).

**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.: ИТМО, 2017. 196 с.

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

**УДК 681.5:629.7** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-11**

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

# ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

*Рассматривается задача оценивания сигналов в комплексной системе измерения высоты и вертикальной скорости летательного аппарата в условиях априорной неопределенности. Предложен алгоритм оценивания параметров траектории летательного аппарата в рамках адаптивного байесовского подхода на основе точечных оценок неизвестных характеристик входных процессов, в частности, интенсивности шума измерения в канале акселерометра. Произведен анализ сходимости получаемых оценок и определена их эффективность (дисперсии ошибки оценки и времени адаптации).*
***Ключевые слова:*** *комплексирование измерителей, адаптивная система оценивания, байесовский метод оценивания, параметры траектории, микромеханический акселерометр, барометрический высотомер.*

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

# EVALUATION OF AIRCRAFT TRAJECTORY PARAMETERS IN APRIORISTIC UNCERTAINTY CONDITIONS REGARDING THE MEASUREMENT INSTRUMENT'S INACCURACY CHARACTERISTICS

*The problem of aircraft height and vertical velocity measuring complex system signal evaluation in aprioristic uncertainty conditions is considered. An algorithm of the aircraft trajectory parameters estimation according to adaptive Bayesian approach based on point estimates of unknown characteristics of input processes is proposed, in particular, the intensity of measurement noise in the accelerometer channel. The convergence of the obtained estimates is analyzed and their effectiveness (variance of the estimation error and adaptation time) is determined.*
***Keywords:*** *measurement instrument's aggregation, estimation adaptive system, Bayesian evaluation method, trajectory parameters, micromechanical accelerometer, barometric altimeter.*

В данной статье рассматривается задача повышения точности измерения высотных параметров при комплексировании [1] показаний одноосного микромеханического акселерометра и барометрического высотомера [2] с применением для оценивания сигналов в условиях априорной неопределенности адаптивного байесовского подхода [3], [4] на основе точечных оценок неизвестных параметров процессов, на примере с неопределенной интенсивностью шума измерения в канале инерциального измерителя. При этом важно обеспечить сходимость адаптивного алгоритма оценивания и его эффективность по таким характеристикам, как дисперсия ошибки оценки и временя адаптации.

Безопасность пилотирования во многом зависит от точности решения навигационных задач [5] на наиболее ответственных режимах полета, таких как взлет и, в особенности, посадка. При последнем необходимо с высокой точностью измерять вертикальную скорость и барометрическую высоту [6].

Выбор метода решения определяется критическим анализом существующих методов и подходов, сформулированных в соответствующих научно-технических и библиографических источниках. В ходе библиографического поиска и обзора литературы выделены источники, имеющие непосредственное отношение к работе. В [7] рассматривается возможность построения ком-

плексной инерциально-спутниковой навигационной системы (ИСНС) по сильносвязанной схеме интеграции на базе нелинейного динамического фильтра Калмана [4] и доказывается повышение точности определения координат по сравнению с применением системы счисления пути и позиционной системы по отдельности. Экспериментальные исследования показали, что точность позиционирования среднего значения невязки счисления [5] увеличена примерно в 2 раза при сравнительно малом значении среднеквадратического отклонения (СКО), что свидетельствует о хороших сглаживающих характеристиках спроектированного фильтра Калмана. Тем не менее в статье не рассмотрена процедура адаптации к изменению шумовой составляющей погрешности бортовых измерителей. В [8] проанализирована эффективность распознавания класса объекта по дальномерным радиолокационным портретам методом статистических испытаний с помощью разработанного моделирующего комплекса. Испытания проведены для двух случаев: с адаптацией, по методу максимального правдоподобия, эталонного дальномерного радиолокационного портрета к пространственной ориентации ЛА и без нее. Заявленные авторами результаты свидетельствуют о том, что используемый метод позволяет существенно повысить эффективность системы распознавания типа ЛА, но не подтверждаются результатами математического моделирования.

Таким образом, на основании приведенных результатов целесообразно рассмотреть методы повышения точности измерения параметров за счет комплексирования, а также, опираясь на данные указанных статей с учетом выявленных недостатков, сформулировать и решить задачу с использованием адаптивной системы оценивания, работающей в реальном масштабе времени, с компенсацией погрешностей измерения при изменяющемся уровне шума измерителей.

Для оценивания сигналов в условиях априорной неопределенности могут использоваться различные подходы [3], [4], [9]. При неизвестном априорном распределении оцениваемых параметров применяются небайесовские методы, в первую очередь, метод максимального правдоподобия [3]–[6]. Другим подходом, применяемым в условиях априорной неопределенности, является минимаксный метод [3], [4], при котором сводится к минимуму условный риск для наихудшего случая, то есть определяется [3] минимаксное решение $\gamma_m$ из условия

$$\min_{\gamma}\max_{x} r(x,\gamma) = \max_{x} r(x,\gamma_{\mathrm{m}}). \qquad (1)$$

Величина $\max_{x} r(x,\gamma_{\mathrm{m}})$ называется минимаксным риском. Минимаксный критерий дает наилучшее решение только для самой неблагоприятной (относительно $x$) ситуации. Такой критерий применяется реже в практических задачах, чем байесовский, так как кроме трудностей нахождения наименее предпочтительного распределения отыскание минимаксного решения характеризуется большими вычислительными зратами на получение оценки. Минимаксный критерий часто используют в устойчивых методах оценивания, которые мало чувствительны к отклонениям параметров от первоначально заданных значений и к дополнительным возмущениям при реализации системы оценивания.

В статье рассматривается применение метода оценивания на основе адаптивного байесовского подхода в условиях параметрической априорной неопределенности относительно характеристик погрешностей измерения. Предполагается, что известны диапазоны неопределенности для параметров погрешностей. При комплексировании учтено, что баровысотомер производит измерения, используя распределения давления по высоте (барометрическая высота), а инерциальный датчик (акселерометр) позволяет определить высоту и вертикальную скорость относительно инерциального пространства после необходимого преобразования (интегрирование) [2], [6]. В алгоритме оценивания производится оптимальное объединение показаний обоих измерителей, обеспечивающее минимальные значения среднеквадратических ошибок оценок в переходном и установившемся режимах.

Модель оцениваемого вектора может быть представлена стохастическим дифференциальным уравнением в векторно-матричной форме:

$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + n_x, \qquad (2)$$

где $x$ – оцениваемый параметр; $A$ – матрица динамики процесса; $n_x$ – вектор формирующих белых шумов.

Оцениваемый вектор состоит из следующих компонентов: $h$ – оцениваемая высота полета; $V_y$ – вертикальная скорость; $\eta_1$ – погрешность баровысотомера (низкочастотная).

Модель измерения баровысотомера имеет следующий вид:

$$y_1 = h + \eta_1 + n_{\eta_1} + n_0, \qquad (3)$$

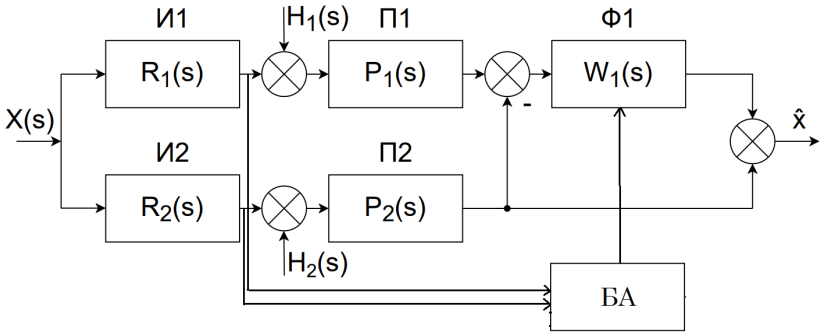



*Рис. 1. Схема системы адаптивного оценивания*

где $h$ – оцениваемая высота полета; $\eta_1$ – погрешность баровысотомера (низкочастотная); $n_0$ – широкополосная погрешность баровысотомера.

Погрешности измерителей представляют собой гауссовско-марковский процесс первого порядка. Низкочастотная погрешность баровысотомера отдельно может быть представлена в виде следующего уравнения:

$$\frac{\mathrm{d}\eta_1}{\mathrm{d}t} = -\alpha_1\eta_1 + n_{\eta_1}, \tag{4}$$

где $\alpha_1$ – параметр, характеризующий ширину спектра погрешности; $n_{\eta_1}$ – формирующий белый шум с интенсивностью $N_x$ и в рекуррентном виде:

$$\eta_{1,k+1} = \Delta t\cdot(-\alpha_1\eta_{1,k} + n_{\eta_{1,k}}) + \eta_{1,k}. \tag{5}$$

Алгоритм адаптивного оценивания построен в рамках байесовского подхода, на основе перестраиваемого фильтра Калмана. Опишем уравнения фильтра Калмана в рекуррентном виде [1], [3], [4], [6]:

Уравнение Риккати (ковариационная матрица ошибок оценок):

$$R_{t+1} = \\ = \Delta t\cdot(N_x + AR_t + R_tA^T - R_tH^TN_0^{-1}HR_t) + R_t. \tag{6}$$

Уравнение для оценки:

$$z_{k+1} = \Delta t\cdot\left(A\cdot z_k + \begin{bmatrix}0\\ y_2\\ 0\end{bmatrix} + K_k\cdot\left[y_1 - h\cdot z_k\right]\right) + z_k. \tag{7}$$

Передаточную функцию вспомогательного фильтра для оценивания интенсивности шума канала акселерометра представим в виде:

$$W(p) = 1 - W_{\text{фнч}}(p) = 1 - \frac{1}{Tp+1} \tag{8}$$

с частотой среза

$$\omega_0 = \frac{1}{T} \gg \omega_{0,a_y},$$

где $\omega_{0,a_y}$ – ширина спектра ускорения. Сигнал на выходе фильтра нижних частот запишем в рекуррентном виде:

$$z_{1,k+1} = \Delta t\cdot\left(-\frac{1}{T}z_{1,k} + \frac{1}{T}y_{2,k}\right) + z_{1,k} \tag{9}$$

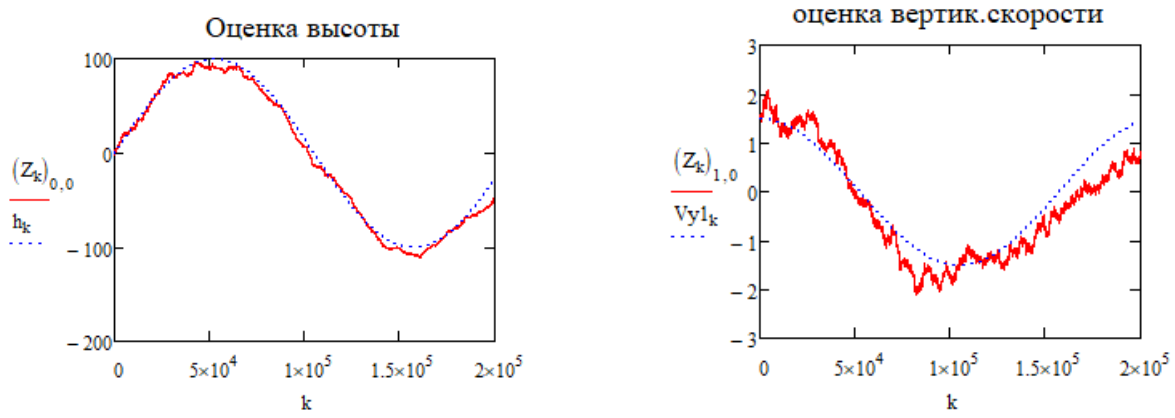
и далее получаем сигнал на выходе вспомогательного фильтра

$$z_2 = y_2 - z_1,$$

соответствующего (8).

Таким образом, рассмотренный способ подстройки параметров фильтра соответствует способу преодоления априорной неопределенности на основе точечной оценки неизвестных параметров. На рис. 1 представлена структурная схема системы адаптивного оценивания. Система, в целом, соответствует схеме с компенсацией погрешностей измерений [1] и включает в себя дополнительный блок адаптации (БА), производящий оценивание неизвестных параметров погрешностей и перестройку основного фильтра.

Моделирование оценивания производилось в программе Mathcad [9] при исходных данных, которые получены из имитационной модели системы оценивания. При моделировании сопоставлялись характеристики неадаптивной системы для штатных значений параметров погрешностей и адаптивной системы в условиях изменяющихся характеристик погрешностей. Сначала рассмотрены процессы для номинальной (постоянной) интенсивности шума акселерометра. На приведенных реализациях (рис. 2) высота полета и вертикальная скорость изменяются по гармоническому закону, что моделирует маневрирование летательного аппарата по высоте.




а) б)

*Рис. 2. Реализации оцениваемых величин и их оценок: а – высота и ее оценка; б – вертикальная скорость и ее оценка*

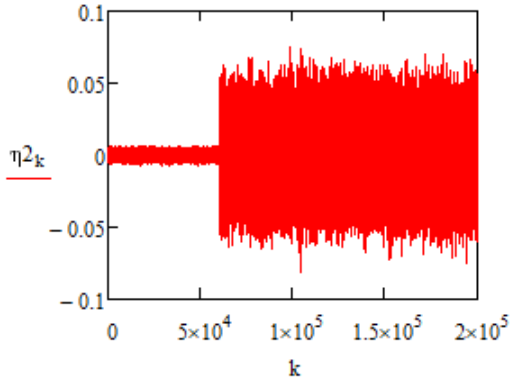
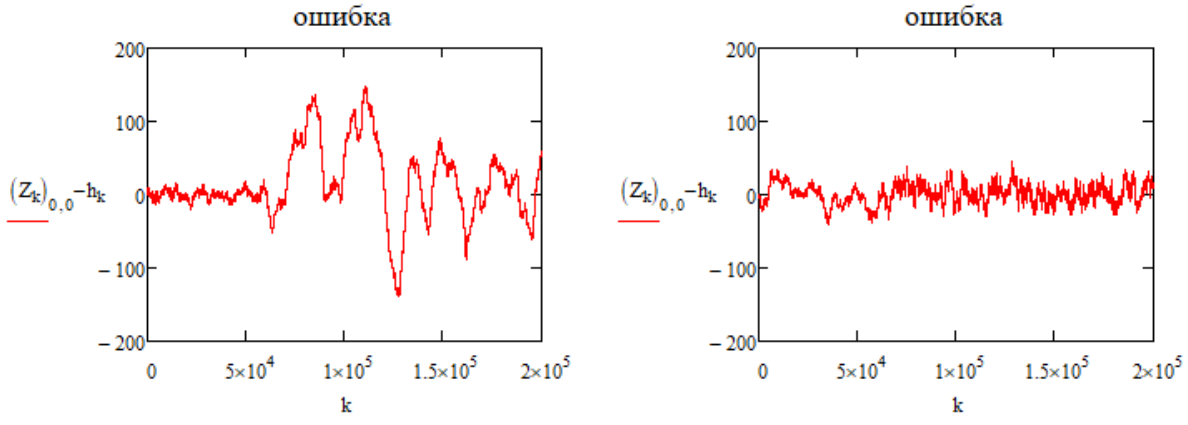



*Рис. 3. Реализация погрешности акселерометра с изменяющейся интенсивностью*

Далее приведена реализация шумовой погрешности акселерометра (рис. 3) для случая изменения ее интенсивности.

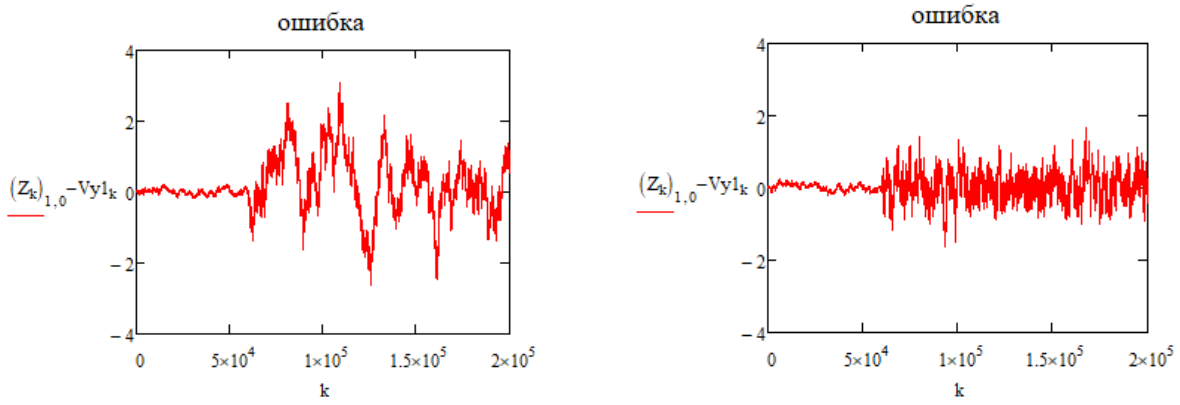
Далее показаны реализации ошибок оцениваемых компонент (рис. 4–6) в неадаптивной и адаптивной системах при попарном сравнении.

Сравнивая реализации ошибок для неадаптивной и адаптивной систем, отметим, что при увеличении шума в канале акселерометра нарастание ошибок оценок у всех оцениваемых компонент происходит в значительно меньшей степени (в несколько раз по дисперсии). Из этого следует, что параметры адаптивной системы подстроились в соответствии с изменившейся интенсивностью шума акселерометра. По окончании переходных процессов в системе, связанных с перенастройкой ее параметров, по своим характеристикам она приближается к оптимальной. Из графиков (рис. 4–6) следует также, что ошибки оценок не содержат в себе полезного сигнала (синусоидального), что свидетельствует об инвариантности системы относительно полезного сигнала.



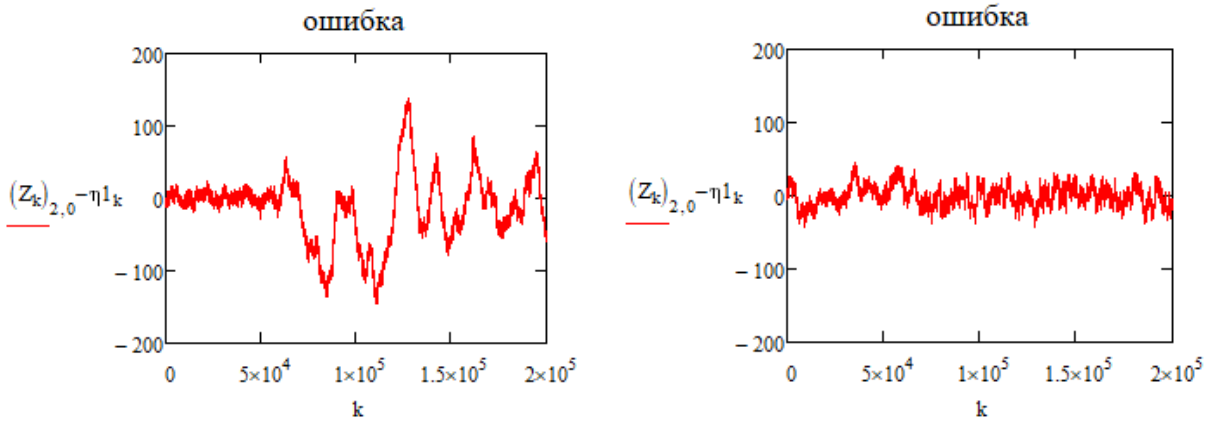

а) б)

*Рис. 4. Реализации ошибки оценки высоты: а – неадаптивная система; б – адаптивная система*




а) б)

*Рис. 5. Реализации ошибки оценки вертикальной скорости: а – неадаптивная система; б – адаптивная система*




а) б)

*Рис. 6. Реализации ошибки оценки низкочастотной погрешности баровысотомера: а – неадаптивная система; б – адаптивная система*

## Библиографический список

1. *Иванов Ю. П., Синяков А. Н., Филатов И. В.* Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. А. Боднера. Л.: Машиностроение, 1984. 207 с.

2. *Боднер В. А., Фридлендер Г. О., Чистяков Н. И.* Авиационные приборы: учеб. пособие для вузов / Под ред. В. А. Боднера. М.: Эколит, 2011. 463 с.

3. *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.

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

5. *Мамаев В. Я.* Воздушная навигация и элементы самолетовождения: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2002. 256 с.

6. *Бабич О. А.* Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1999. 432 с.

7. Комплексирование данных навигационных систем на основе нелинейного фильтра Калмана / А. В. Грибовский, Р. Р. Исмаилов, К. В. Козадаев // Информатика. 2012. № 1 (33). С. 106–114.

8. Повышение эффективности систем радиолокационного распознавания за счет адаптации к пространственной ориентации объекта наблюдения / С. Н. Ярмолик, М. В. Свинарский, А. С. Храменков, Е. В. Зайко // Доклады БГУИР. 2019. № 4 (122). С. 40–47.

9. Технология вычислений в системе компьютерной математики Mathcad: учеб. пособие / В. А. Холоднов, В. П. Дьяконов, В. В. Фонарь и др. СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2013. 154 с.

**УДК 378.147**

***А. В. Небылов****
*доктор технических наук, профессор*
***В. А. Небылов*****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Международный институт передовых аэрокосмических технологий*

# БУДЕТ ЛИ ПОСТРОЕН НОВЫЙ БОЛЬШОЙ ЭКРАНОПЛАН?

*Рассматривается вопрос возможности построения нового большого экраноплана. Обоснована эффективность их использования для решения транспортных задач и выполнения миссий в различных сферах. Сформулированы требования к системам управления перспективными экранопланами и дана оценка стоимости построения подобного летательного аппарата.*
***Ключевые слова:*** *экраноплан, WIG – craft, функциональное назначение, требования к системам управления, искусственный интеллект.*

***A. V. Nebylov****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***V. A. Nebylov*****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***International Institute for Advanced Aerospace Technologies*

# WILL A NEW LARGE EKRANOPLANE BE BUILT?

*This article discusses the possibility of building a new large ekranoplane. The effectiveness of their use in performing different tasks and missions in various fields is substantiated. The requirements for the control systems of prospective ekranoplanes are provided and an estimate of the cost of building such an aircraft is given.*
***Keywords:*** *ekranoplan, WIG – craft, functional purpose, requirements for control systems, artificial intelligence.*

## Введение

В последние несколько лет можно заметить ускоренное проявление хорошо видимых достижений технического прогресса в разных областях. Возможно, пандемия приучила ученых к необходимости предельно быстро внедрять свои научные результаты в практику. Возможно, государство научилось правильно выбирать для поддержки наиболее важные научные направления и необходимое финансирование стало наконец доходить до научных коллективов, способных осуществить прорыв в своей области, например, в энергетике. Способность распознавать человеческие лица при входе в метро вполне можно назвать выдающимся практическим достижением методов искусственного интеллекта. Маршрутные автобусы без водителя – тоже. В космонавтике сокращение времени сближения и стыковки транспортного корабля с МКС до двух орбитальных витков, обеспечение многоразовости использования ступеней корабля способствуют снижению удельной стоимости и повышению безопасности запуска. Быстрое развитие гиперзвуковых крыльевых летательных аппаратов, повышение точности их наведения совершенно изменили возможные миссии, выполняемые ими, и не только в оборонных применениях. Высокоточное управление движением, наведение позволили значительно снизить требуемую массу полезной нагрузки, вес и габариты управляемых снарядов. Это в свою очередь позволило отказаться от строительства крупных дорогостоящих кораблей и перейти к сравнительно небольшим фрегатам, решающим те же оборонные задачи. Повсеместно внедряемые скоростные поезда совершают революцию на железнодорожном транспорте, обеспечивая почти авиационные скорости перевозок и большую комфортность.

Однако одна весьма старая научная транспортная проблема находился в стадии подготовки решения уже 30 лет и пока по-прежнему не решена. Речь идет о построении больших экранопланов со взлетной массой 600–800 т, способных эффективно занять область транс-

портного пространства вблизи водной поверхности, но без водоизмещения. Построив единичные экземпляры крупнейших экранопланов «КМ» и «Лунь» (540 т и 380 т соответственно), главный конструктор Р. Е. Алексеев дал сильный импульс к развитию экранопланов, но критики этого транспортного направления до сих пор очень сильны и баланс сил различных корпоративных групп очень неустойчив. В связи с этим любая точка зрения специалистов по этим вопросам требует обсуждения для принятия правильного решения.

## Обоснование эффективности экранопланов

Особенно необходимы существенные аргументы для обоснования эффективности многофункционального использования тяжелых экранопланов. В последние несколько лет к числу аргументов «за» добавились необходимость:

– быстрого развития инфраструктуры и транспортного обеспечения арктических районов со сравнительно ровной поверхностью торосов и снега;

– использования удобного для поисково-спасательных работ в тихоокеанском регионе скоростного амфибийного транспортного аппарата для поиска и эвакуации посадочной капсулы космических кораблей, запускаемых с нового российского космодрома Восточный;

– развития аварийно-спасательных средств, пригодных для работы в зонах наводнений и пожаров;

– усиленного патрулирования морских границ России в зонах Черного и Каспийского морей, Северного Ледовитого океана.

А также постоянный рост потребности в скоростных перевозках крупногабаритных грузов.

Как результат, в конце 2018 года вице-премьер Ю. Борисов заявил о включении в очередной план разработку экспериментального экраноплана «Орлан» взлетной массой в 800 т со сроком постройки головного образца в 2027 году [4–7]. Ни аэрогидродинамическая схема, ни концепция построения этого весьма дорогого транспортного аппарата не были оговорены. С тех пор никаких публичных комментариев не последовало, что напоминает историю с американским тяжелым экранолетом Boeing Pelican Ultra, (UltraLargeTransportAircraft), заявленная масса которого 2700 т. Разработку вело исследовательского подразделения «Phantom-Works» концерна Boeing. Практически все расчетные характеристики были опубликованы до 2003 года, после чего публикации прекратились. Сейчас ясно, что Boeing столкнулся с непредвиденными ранее трудностями конструирования экранолета, потребовавшими дополнительного финансирования. Вряд ли повторилась российская «ведомственная» проблема, когда ни авиация, ни флот не захотели принимать на себя заботу о «чужой» для них технике. «Pelican», в отличие от «Луня», имел мощное шасси и мог использовать аэродромы для взлета и посадки, что безусловно относило его к морской авиации, а не к кораблям. Другое существенное отличие «Pelican» от «Луня» состояло в отсутствии высоко поднятого хвостового стабилизатора, что заставляло усиленно использовать средства автоматического управления для обеспечения устойчивости движения в продольной плоскости.

## Требования к системам управления

Для системы управления «Орлана» и других российских экранопланов необходимо разработать и применить методы синтеза, позволяющие в полной мере учесть их особенности [8]–[12], а также обеспечить абсолютно надежное функционирование синтезируемых систем во всей допустимой области изменения фазовых координат и полностью исключить даже небольшую вероятность выхода за пределы такой допустимой области. Гарантирование устойчивости должно быть основной прерогативой системы управления, после реализации которой должны быть учтены и требования по качеству управления, в частности, по быстроте выполнения стандартных маневров и по точности выдерживания требуемых значений параметров полета. Многомерная система управления должна строиться как интеллектуальная, то есть с привлечением всех известных сейчас принципов искусственного интеллекта и выполнять все функции управления лучше пилота. Следует синтезировать и проектировать именно автоматическую, а не автоматизированную систему, исключив понятие сбоя в функционировании системы или пилота. Отказы отдельных элементов системы, например, вследствие радиоэлектронной борьбы, механического повреждения, грозовых фронтов должны приводить к реконфигурации системы при использовании ее структурной избыточности. Современный выбор перспективных комплектующих для системы управления позволяет повысить их надежность на два порядка. В кресле пилота может сидеть оператор, полностью доверяющий управление автомату и думающий только о формулировании общих требований

к траектории полета. Только исключительные, действительно непредвиденные обстоятельства могут потребовать вмешательства пилота в управление полетом, причем в режиме экстренной посадки. Во время проектирования «Луня» построить интеллектуальную систему управления было невозможно из-за ограничений и в методах и средствах проектирования, и в элементной базе. Сейчас такие ограничения сняты и разработчики могут реализовать действительно современную систему, ориентируясь на достижения авиации 5-го поколения. Именно на такой подход к проектированию указывают данные, опубликованные о проекте «Пеликан». Другую полезную информацию можно извлечь из формулировки «При полете с использованием экранного эффекта Pelican ULTRA мог бы доставлять грузы на дальность около 10 тыс. миль, но при полете на высоте – только 6,5 тыс. миль» [7]. Это означает, что аэродинамическое качество «Пеликана» в экранном режиме, то есть на высоте 6м при хорде крыла 30 м (относительная высота 6/30=0,2), в 10/6,5=1,54 раза больше, чем в «самолетном» режиме. Если для самолетного режима принять качество 17, то для экранного ежима получим 17×1,54 =26,2, что хорошо для снижения стоимости межконтинентальных перевозок. Именно такая цель очевидно стояла перед разработчиками «Пеликана».

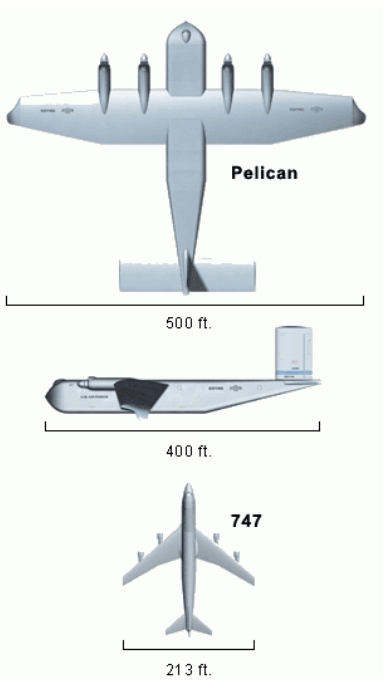
## Стоимостные оценки

Стоимость изготовления одного опытного образца «Пеликана» можно оценить по приближенной формуле [1], [2], [8]

$$C = K_1M + K_2P + K_3Q, \qquad (1)$$

где $K_1$ = 45.8 тыс. долл./т; $K_2$ = 1,54 тыс. долл./л. с. и $K_3$ = 25.0 тыс. долл.; $M$ – масса экраноплана в тоннах; $P$ – суммарная тяга двигателей в лошадиных силах; $Q$ – аэродинамическое качество экраноплана в экранном режиме полета. Смысл этой формулы состоит в грубом экстраполировании стоимости известных уже построенных аппаратов на случай новых более совершенных и более тяжелых аппаратов. Коэффициенты $K_1$, $K_2$ и $K_3$ определены исходя из опыта предыдущих проектов и позволяют оценить стоимость $C$ более тяжелого экраноплана «Пеликан». Подставляя значения $M$ = 2700 т, $P = 640\times10^3$ л. с., $Q$ = 27, для стоимости изготовления опытного образца получим оценку C = $1110M, то есть 1,110 миллиарда долларов (один миллиард сто десять миллионов долларов США). Сюда не входит стоимость разработки, которая может составлять примерно 2$C$.

а)




б)

*Рис. 1. Экранолет Boeing Pelican: а – общий вид в полете; б – вертикальная и горизонтальная проекции*

Наверное, сравнив полученную величину $C$ со стоимостью тяжелого транспортного самолета B–747 в $380M (триста восемьдесят миллионов долларов США) и поняв, что вместо одного тяжелого экраноплана можно купить 8 самолетов B–747 или 10 самолетов C5MGalaxy (корпорация Локхид), у заказчиков и разработчиков потерялся интерес к проекту «Пеликан».

Для российского проекта Орлан масса аппарата в 4 раза меньше, чем у Pelican. Считая про-

порции по стоимости и по массе одинаковыми, грубо оценим стоимость Орлана в 1110/4 = 252М млн долларов. Это сопоставимо со стоимостью трех среднемагистральных самолетов МС–21–300. Это не слишком много, учитывая многофункциональность Орлана и уникальность некоторых его миссий.

Заметим, что в условиях непредвиденных расходов на защиту от пандемии есть корпоративные предложения строить экспериментальный эраноплан с массой менее 600 т, что конечно удешевит проект. Однако необходимо понимать, что при 600 т мореходность обеспечивается даже при волнении в 7 баллов по шкале ГУГМС, то есть практически всепогодно, а при массе 60 т – только до 3 баллов. А ведь при встрече посадочной капсулы с космонавтами ждать подходящей погоды невозможно. Поэтому необходим именно большой экраноплан со взлетной массой не менее 600 т.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту 22–19-00631.

## Заключение

Сформулированы приоритеты в развитии новых технологий проектирования тяжелого экспериментального экраноплана «Орлан» и его информационно-управляющего комплекса. Дана оценка стоимости проектирования летательного аппарата на начальном этапе проектирования, проверенная на предыдущих проектах подобных аппаратов с уже известной стоимостью. Показано, что стоимость создания тяжелого экраноплана может на порядок превышать стоимость тяжелого транспортного самолета с известной аэродинамической схемой (например, B–747 или C–5 Galaxy).

### Библиографический список

1. *Небылов А. В.* Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб., 1994. 206 с.

2. *Nebylov A. V., Wilson P. A.* Ekranoplanes: Controlled Flight Close to the Sea. WIT-Press, UK, 250 p.

3. *Диомидов В. Б.* Автоматическое управления полетом экраноплана. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1996, 204 с.

4. Авиация России. Опытный ракетный экраноплан «Орлан» появится к 2027 году. URL: https://aviation21.ru/opytnyj-raketnyj-ekranoplan-orlan-poyavitsya-k–2027-godu (дата обращения: 08.08.2020).

5. *Болгова Е.* В России создадут экраноплан. URL: https://www.spb.kp.ru/online/news/3229509 (дата обращения: 29.07.2020).

6. Проект сверхтяжелого самолета-экраноплана Boeing Pelican ULTRA (США). URL: https://topwar.ru/35114-proekt-sverhtyazhelogo-samoleta-ekranoplana-boeing-pelican-ultra-ssha.html (дата обращения: 08.08.2020).

7. Проект сверхтяжелого самолета-экраноплана Boeing Pelican Ultra (США). URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Boeing_Pelican (дата обращения: 08.08.2020).

8. *Nebylov A., Panferov A., Brodsky S.* Application of CFD to WIG-craft motion control system design EUCASS–2019 8th European Conference for AeroSpace Sciences (EUCASS–2019), 1–4 July. Madrid, 2019.

9. *Nebylov A., Nebylov V., Panferov A.* The Concept of choice and Stabilization of the Flight Altitude of WIG-Craft over the Waved Sea. 21st IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Cranfield, 2019.

10. *Nebylov A., Watson J.* Aerospace Navigation Systems, John Wiley Sons. UK, 2016. 371 p.

11. *Nebylov A.* Ensuring control accuracy. Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2004. 244 p.

12. *Nebylov A.* Aerospace Sensors. Momentum Press. NY, 2013. 350 p.

13. *Davis D.* Manmade UFOs. URL: https://manmade-ufos.com/alexander-lippisch (дата обращения: 01.11.2020).

14. Loz Blain. Could the Airfish–8 finally get the Wing In Ground Effect Vehicle up and running? URL: https://newatlas.com/wigetworks-airfish–8-ground-effect-vehicle/56184/ (дата обращения: 01.10.2020).

**УДК 378.147**

***В. Синь****
*доктор технических наук, профессор*
***Д. Гонг****
*доктор технических наук, профессор*
***В. В. Перлюк*****
*кандидат технических наук, доцент*
**Шэньянский политехнический университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА НАВЕДЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ УГЛА ВСТРЕЧИ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

*В этой статье представлен закон оптимального управления с ограничением угла встречи с целью для различных систем управления полета по траектории без учета системной задержки. На основе линеаризации вводится теория оптимального управления, изучается закон оконечного наведения ракеты, сначала рассчитывается индекс оптимальных характеристик, а затем выводится закон наведения с ограничением на оконечный угол встречи, который обеспечивает минимальное количество затрачиваемой энергии. Результаты моделирования показывают, что может быть получен оптимальный закон наведения с ограничением по углу встречи. Его преимущества и реализуемость подтверждены численным моделированием.*
***Ключевые слова:*** *угловое ограничение, оптимальный закон наведения, оптимальное управление.*

***W. Xin****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***J. Gong****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***V. V. Perliouk*****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# STUDY OF GUIDANCE LAW WITH LANDING ANGLE CONSTRAINT BASED ON OPTIMAL CONTROL

*This paper presents an optimal guidance law with impact angle constraint in any order guidance system without considering system delay. On the basis of linearization, the optimal control theory is introduced, the terminal guidance law of the missile is studied, the optimal performance index is first designed, and then the guidance law with terminal landing angle constraint is derived, which consumes less energy. The simulation results show that the optimal guidance law with landing angle constraint is derived. Its superiority and feasibility are proved by numerical simulation*
***Keywords:*** *angle constraint, optimal guidance law, optimum control.*

## Введение

Оптимальное управление относится к поиску управляющей команды в определенном диапазоне ограничений, чтобы управляемая система могла удовлетворить ожидаемые требования к характеристикам в соответствии с определенным показателем. Возможность найти лучшую схему управления из общих условий функционирования объекта управления является характеристикой оптимального управления. В терминах современного управления, нетрудно понять, что суть оптимального управления заключается в решении вариационной задачи. В некоторых задачах с ограничениями с помощью вариационной теории трудно найти удовлетворительное решение. Современная вариационная теория позволяет находить решение такого рода задачь с ограничениями [1]. Столкнувшись с проблемой замкнутого набора ограничений, ученые бывшего Советского Союза выдвинули принцип минимума. Развитая на основе этого вариационная теория может эффективно решить проблему ограничений замкнутого множества. В то же время вводится принцип оптимальности для задачи динамиче-

ского программирования, чтобы сделать компьютерное решение более удобным и быстрым [2].

В этой статье, основанной на теории оптимального управления, теория оптимального управления используется для исследования точности наведения с ограничениями на конечный угол встречи с целью. Во-первых, представлены история развития теории оптимального управления, общая формулировка и описание задачи линейной квадратичной формы. Учитывая простоту получения закона наведения и наблюдаемость при проверке выполнения закона наведения, уравнение движения ракеты и цели линеаризуется и делается предположение о малом угле встречи [3]. Затем выводится оптимальный закон наведения с ограничением угла встречи с целью. Его преимущества и реализуемость подтверждены численным моделированием.

## Общая постановка задачи оптимального управления

### Математическая модель объекта управления

Управляемый объект обычно использует контроллер для достижения определенного ожидаемого показателя функционирования. В этом процессе закон движения объекта обычно описывается уравнением состояния [4]. Соответствующее математическое описание этого закона может быть выражено в виде математической модели управляемого объекта. Обычно оно выражается как:

$$\dot{x}(t) = f\left(x(t), u(t), t\right), x(t_0) = x_0, \qquad (1)$$

где $x$ – $n$-мерный вектор состояния объекта; $u$ – $r$-мерный вектор управления объекта, $1 \le r \le n$.

*Набор целей управления*

Система управляется для получения набора точек в пространстве состояний, то есть $R^n$, состояния конечного значения.

$$S = \left\{ xg_1(x(T), T) = 0, g_2(x(T), T) \le 0 \right\}, \qquad (2)$$

где $S$ – набор целей системы управления; $g_1$ – $k_1$ – размерная векторная функция $k_1 \le n$; $g_2$ – $k_2$ – размерная векторная функция.

*Допустимый контроль*

В реальной системе контролируемый объект задается с большим количеством ограничений, которые могут быть наложены на управляющую функцию $u$ $(t)$ принимающего значение $R^n$ в наборе пространства управления $U \subset R^r$. Кусочно-непрерывная векторная функция, определенная в интервале времени $[t_0, T]$ и принимающая значение, $U$ называется допустимым управлением:

$$\varphi(u(t)) \le 0 \qquad (3)$$

$$u(t) \in U, \forall t \in \left[t_o, T\right], \qquad (4)$$

где $\varphi - p$ – размерная векторная функция; $U$ – домен управления.

*Индекс эффективности*

Оптимальная обработка означает, что управляемый объект или целевая функция может быстро достичь желаемой стандартной производительности [5].

1. Индекс эффективности классификации отражает общую роль во всем процессе контроля

$$J(u) = \int_{t_0}^{T} L(x(t), u(t), t)dt\ . \qquad (5)$$

2. Индекс эффективности конечной целевой функции, который подчеркивает требования к статусу конечной цели оптимизации

$$J(u) = K(x(t), T)\,. \qquad (6)$$

3. В сочетании с вышеуказанными преимуществами составной индекс эффективности оказывает определенное влияние на глобальные и конечные значения

$$J(u(t)) = K(x(T), T) + \int_{t_0}^{T} L(x(t), u(t), t)dt. \qquad (7)$$

*Описание линейно-квадратичной задачи*

Изучение линейной квадратичной формы имеет особое значение для физической реализуемости системы управления, имеет хорошее значение показателя скорости, точности и стабильности, математическое выражение оптимального решения четкое и стандартизованное, а закон управления выражается в форме обратной связи для переменных состояния. Математическое решение при этом получается более простым [6]. Оно широко используется в теоретических исследованиях и практических инженерных приложениях и признан многими учеными и разработчикам [7], [8]. Основы теории линейно-квадратичной задачи обсуждаются ниже.

Пусть уравнение состояния линейной системы имеет вид:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t); \qquad (8)$$

$$y(t) = C(t)x(t). \quad (9)$$

Укажем вектор ошибок:

$$e(t) = y(t) - y_R(t). \quad (10)$$

По возможности малыми предлагаются следующие квадратичные показатели эффективности:

$$J = \frac{1}{2}e^T(T)Fe(T) + \frac{1}{2}\int_{t_0}^{T}\left[e^T Q(t)e + u^T R(t)u\right]dt, \quad (11)$$

где $F$ – положительно определенная матрица; $Q(t)$ – $m \times m$ – положительная полуопределенная функциональная матрица; $R(t)$ – положительно определенная функциональная матрица.

## Моделирование и анализ движения ракеты на фазе контактного наведения

На рис. 1 представлена общая схема пересечения траекторий ракеты и цели:

– относительное положение центроида ракеты под наземной системой;

– относительное положение центроида цели под системой центроидов.

Линия между ними называется линией визирования. Линейное расстояние между двумя центроидами называется расстоянием относительного движения между ракетой и целью [9].

Подстрочный индекс указывает начальное значение времени лоя каждого параметра. В соответствии с рис. 1 уравнение движения ракеты можно выразить следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{R} = V_T \cos\varepsilon_T - V_m \cos\varepsilon \\ \dot{\theta} = \dfrac{1}{R}\left(V_m \sin\varepsilon - V_T \sin\varepsilon_T\right) \\ \dot{x} = V_m \cos\gamma \\ \dot{y} = V_m \sin\gamma \\ V_R = V_m \cos\varepsilon \end{cases}, \quad (12)$$

где $V_R$ – составляющая скорости линии визирования.

## Оптимальный закон наведения с ограничением угла без задержки

Передаточная функция выглядит следующим образом:

$$\frac{a_m(s)}{u(s)} = 1. \quad (13)$$

Из уравнения (13) оптимальную управляющую величину можно записать следующим образом:

$$u^*(t) = a_1\left[y(t_f) - y_f\right]t_g + a_2\left[\gamma(t_f) - q_{F_{INS}}\right]; \quad (14)$$

$$t_g = t_f - t, \quad (15)$$

где $t_g$ – оставшееся время полета ракеты.

Оптимальный сигнал управления выглядит следующим образом:

$$u^*(t) = Ct_g + D = \frac{V_m}{t_g^2}\left[\frac{6y(t)}{V_m} + 4t_g\gamma + 2t_g q_{F_{INS}}\right]. \quad (16)$$

В этом случае $y(t)$ заменяется на $\theta$, формула (16) может быть записана как:

$$u^* = \frac{V_m}{t_g}\left[6\theta + 4\gamma + 2q_{F_{INS}}\right]; \quad (17)$$

$$C = a_1\left[y(t_f) - y_f\right] = \left(\frac{6V_m}{t_g^2}\right)\left[2\theta + \gamma + q_{F_{INS}}\right]; \quad (18)$$

$$D = a_2\left[\gamma(t_f) - q_{F_{INS}}\right] = -\left(\frac{2V_m}{t_g}\right)\left[3\theta + \gamma + 2q_{F_{INS}}\right]. \quad (19)$$

**Линеаризация и гипотеза малых углов**

Согласно приведенному выше уравнению движения ракеты можно видеть, что относительное движение цели ракеты является нели-

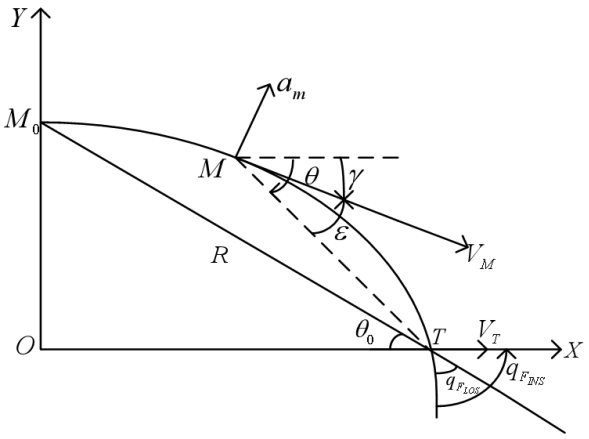



*Рис. 1. Двумерная диаграмма относительного движения ракеты и цели: M – Ракета класса «воздух-земля»; T – атакуемая цель; R – относительное расстояние прицеливания между ракетой и целью; θ – угол прямой видимости в направлении ракеты и цели; γ – угол наклона траектории; ε – угол поля зрения (угол опережения скорости) искателя; $V_m$ – скорость ракеты; $a_m$ – командное ускорение ракеты «воздух-земля»; $q_{FINS}$ – ожидаемый угол встречи в инерциальной системе координат; $q_{FLOS}$ – ожидаемый угол встречи начальной системы наведения ракеты*

нейной зависимостью. Чтобы облегчить исследование и обсуждение оптимального закона наведения при ограничении угла встреч, очень важно линеаризовать нелинейную модель движения цели относительно ракеты. После получения упрощенной линеаризованной модели требуемый закон наведения может быть выведен более лаконично в соответствии с упрощенной моделью. После предположения о специальной величине и малом угле линеаризация легко завершается [10]. При малых углах траектории полета ракеты в воздухе (20) можно записать:

$$\begin{cases} \dot{R} = V_T - V_m \\ \dot{\theta} = \dfrac{1}{R}\left(V_m \varepsilon - V_T \varepsilon_T\right) \\ \dot{x} = V_m \\ \dot{y} = V_m \dot{\theta} = k\dot{\gamma} \\ V_R = V_m \end{cases} \quad (20)$$

Очень важно для применения линеаризованного закона наведения выяснить, является ли закон наведения, полученный из линеаризованной модели, согласованным или подобным закону наведения, полученному из нелинейной модели. Предыдущие исследования в этой области подтвердили, что линеаризация может обеспечить вывод закона наведения в соответствии с результатами численного моделирования. Эта статья доказывает, что два ниже описываемых закона наведения согласованы между собой. Только так они могут быть использованы в более поздних выводах и приложениях.

Метод пропорционального наведения относится к классической теории управления. Его структура проста и легко реализуема. Здесь основным параметром наведения является скорость изменения линии визирования. Поскольку информация о расстоянии и оставшемся времени полета не требуется, простота пропорционального наведения заключается в том, что ракета должна иметь только соответствующие датчики, а наведение на пульте оператора может быть выполнено путем приема переданного сигнала [11]. В этой статье классический пропорциональный закон наведения используется для проверки возможности линеаризации в нелинейной системе наведения ракеты. Классический пропорциональный закон управления траекторией:

$$\dot{\theta} = k\dot{\gamma}, \quad (21)$$

где $\dot{\theta}$ – скорость изменения угла прямой видимости; $k$ – постоянный коэффициент; $\dot{\gamma}$ – скорость изменения наклона траектории.

Пусть $k = 3$ и проведем численное моделирование. Начальные условия моделирования приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Начальные значения для моделирования классического пропорционального закона наведения**

| Баллистические параметры | Наклон траектории |
|---|---|
| Исходное положение ракеты $(X_0, Y_0)$ | (0,8000) |
| Местоположение цели $(X_T, Y_T)$ | (5000,0) |
| Скорость ракеты, $V_o$ | 400 м/сек |
| Скорость цели $V_T$ | 20 м/сек |

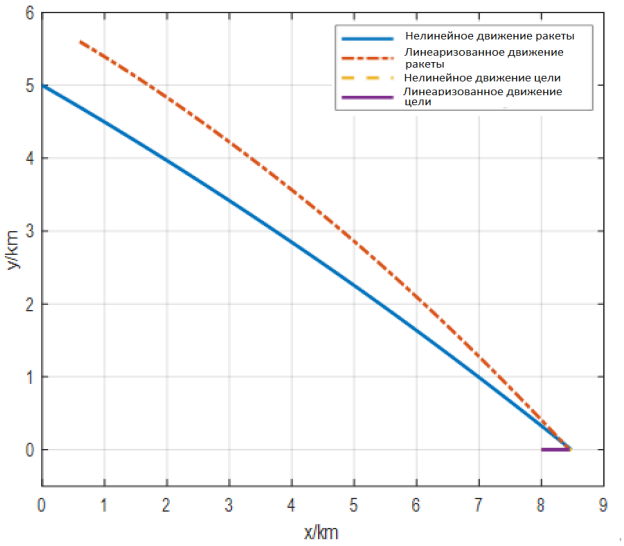



*Рис. 2. Сравнение траектории ракеты и цели при линейном и нелинейном движении*

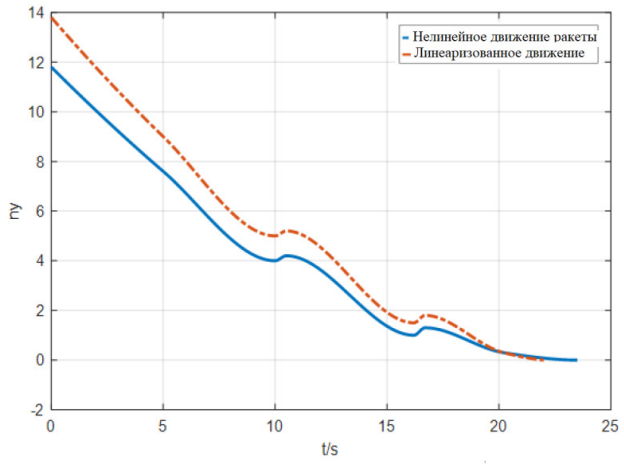



*Рис. 3. Сравнение перегрузки между линейным и нелинейным движением*

На рис. 2 и 3 показаны кривые изменения траектории и нормальной перегрузки ракеты в линеаризованной и нелинейной моделях соответственно. Из этих рисунков видно, что линеаризация модели не влияет на конечный эффект наведения, но влияет на процесс наведения, то есть время наведения ракеты становится меньше после линеаризации модели; Тенденция изменения кривой перегрузки в общей онлайн-модели в основном согласуется с таковой в нелинейной модели. Таким образом, видно, что изменения других параметров в процессе наведения ракеты также согласованы.

Из различных индексов параметров нетрудно увидеть, что линеаризованная модель мало влияет на систему наведения ракеты, а упрощенный процесс исследования в процессе наведения и процесс управления в реальном производстве принесли большое удобство.

## Оценка оставшегося времени полета ракеты

Оставшееся время полета в оптимальном законе наведения относится к разнице между расчетным временем полета и текущим временем. В большинстве законов наведения ракет класса «воздух-земля» оставшееся время полета является очень важным параметром оптимизации, но его конкретное значение не может быть получено непосредственно путем расчетов. Его можно оценить, только рассматривая собственное состояние ракеты. Точность его оценки в разной степени влияет на выполнение этих законов наведения и эффект перехвата. Оставшееся время полета определяется следующим образом:

$$t_g = -\frac{R}{\dot{R}}. \qquad (22)$$

Для ракет класса «воздух-земля'», атакующих наземную стационарную цель, относительное расстояние от ракеты до цели в формуле (22) может быть напрямую измерено бортовым приборным оборудованием, но скорость изменения расстояния от ракеты до цели должна быть рассчитана по следующей формуле:

$$\dot{R} = -V_m \cos(\theta - \gamma). \qquad (23)$$

## Моделирование и проверка

*Моделирование одного и того же угла траектории при разных углах встречи*

Закон наведения состоит из различных параметров, и влияние каждого параметра на закон наведения анализируется с помощью моделирования. Шаг моделирования и начальные условия моделирования показаны в табл. 2. Кривые изменения различных параметров при различных ограничениях угла встречи показаны на рис. 4–5.

*Таблица 2*

**Начальные значения для моделирования с учетом ограничений по углу встречи ракеты и цели**

| Баллистические параметры | Наклон траектории |
|---|---|
| Исходное положение ракеты $(X_0,Y_0)$ | (0,13000) |
| Местоположение цели $(X_T,Y_T)$ | (8500,0) |
| Скорость ракеты, $V_o$ | 1200 м/сек |
| Наклон траектории $\gamma_0$ | 0 ° |

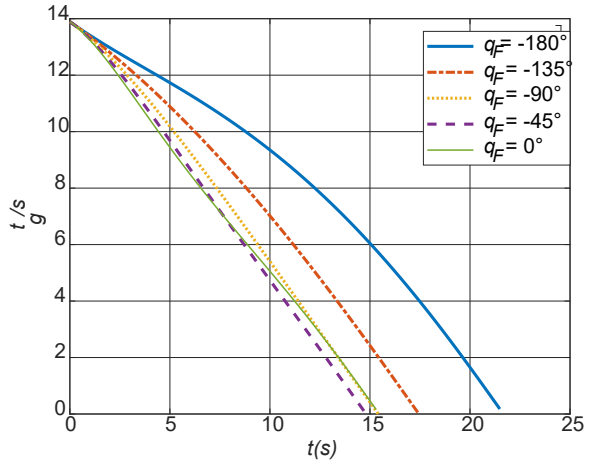



*Рис. 4. Оставшееся время полета*

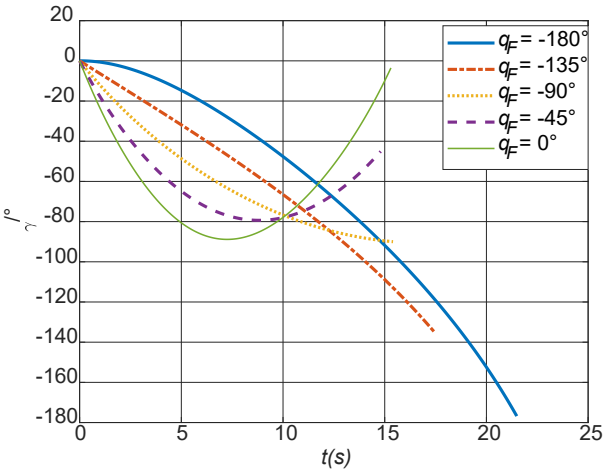



*Рис. 5. Баллистический наклон*

## Заключение

Подробно рассмотрен оптимальный закон наведения с ограничением на угол встречи. Путем анализа кинематической модели ракеты в полете получается уравнение относительного движения ракеты и цели, которое обеспечивает математическую онову для последующих исследований закона наведения ракеты «воздух- земля». Система наведения может измерять все виды сигналов, такие как относительное положение ракеты и цели, угол между траекториями и завершать расчет, вычисляя наилучший угол сближения с целью, а затем генерировать программу наведения для ее поражения. Выполненное численное моделирование закона наведения и результаты компьютерного моделирования показывают, что в соответствии с законом наведения теоретически можно достичь любого желаемого угла встречи при условии, что величина промаха мала, а траектория полеты ракеты плавная, сто может обеспечить теоретическую основу для практического инженерного применения.

### Библиографический список

1. *Li H., Wang X.* Optimal guidance law with landing angle constraint for seeker with dynamic delay // Journal of ordnance equipment engineering, 2018. 39 (07). P. 40–44.

2. *Mu Z., Wu J., Han X.* Vertical attack sliding mode guidance law based on biased proportional guidance // Navigation positioning and timing. 2019. 6 (06). P. 76–81.

3. *Lee C., Ryu M.* Practical generalized optimal guidance law with impact angle constraint // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol. 233. 2019. P. 3790–3809.

4. *Zhang W., Yi W.* Three-dimensional impact angle guidance law based on robust repetitive control // SN Applied Sciences. Vol. 1. 2019. P. 1–7.

5. *Li H., Wang X.* Optimal terminal guidance law of guided projectile with multiple constraints // Nanjing University of Technology. 2019.

6. *Zhu T.* The legitimacy analysis of the major wars launched by the United States after the Cold War: Taking the Gulf War, Afghanistan war and Iraq war as examples // International outlook. 2018 (5). P. 117–135.

7. *Wang N. Y.* Research on terminal guidance law of high speed air to surface missile considering angle of fall / field of view constraint // Harbin Institute of Technology. 2019.

8. *Jiang S., Tian F., Sun S.* Adaptive radial basis space terminal guidance law considering landing angle constraint and pilot characteristics // Journal of National University of Defense Science and technology. 2019. 41 (06). P. 100–110.

9. *Chen Y., Chang Y.* Application of optimal guidance law of falling angle constraint in air to ground missile // Journal of missile and guidance. 2018. 38 (05). P. 141–144.

10. *Zeng Y., Gu Y.* Design of terminal guidance law with joint angle of attack constraining field of view angle and landing angle // Aerospace control. 2018. 36 (01). P. 14–18.

11. *Liu Q., Chen J., Wang L.* Design of Adaptive Fractional sliding mode guidance law with three-dimensional fall angle constraint // Modern defense technology. 2018. 46 (02). P. 68–74.

**УДК 621.01** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-26**

***Х. Сяоян****
*доктор технических наук, профессор*
***С. В. Богословский*****
*доктор технических наук, профессор*
***А. Р. Жежерин*****
*кандидат технических наук, доцент*
***В. В. Перлюк*****
*кандидат технических наук, доцент*
***А. В. Сорокина*****
*магистрант*
**Шэньянский политехнический университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ПАВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

*В настоящее время перспективным направлением в измерительной технике является создание датчиков, передающих информацию об измеряемом параметре при помощи радиоканала. В данной статье приведены результаты исследования датчика, предназначенного для измерения неоднородных механических деформаций (или напряжений).*
***Ключевые слова:*** *датчики для измерения механических деформаций, поверхностные акустические волны, частотная характеристика.*

***H. Xiaoyang****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***S. V. Bogoslovsky*****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***A. R. Zhezherin*****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***V. V. Perliouk*****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***A. V. Sorokina*****
*Postgraduate Student*
**School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A SURFACTANT SENSOR FOR MEASURING MECHANICAL DEFORMATION

*Currently, a promising direction in measuring technology is the creation of sensors that transmit information about the measured parameter using a radio channel. This article presents the results of a study of a sensor designed to measure inhomogeneous mechanical deformations (or stresses).*
***Keywords:*** *sensors for measuring mechanical deformations, surface acoustic waves, frequency response.*

## Конструкция датчика деформации

Датчик состоит из конструкции, представляющей собой параллелограмм Роберваля (рис. 1) и чувствительного элемента (ЧЭ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), прикрепленного к «плечикам» конструкции.

Здесь ЧЭ представляет собой пьезопластину из $LiNbO_3$YX128 ° с нанесенными на нее встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) и отражательными структурами (ОС), выполненными в виде канавок на поверхности подложки и расположенными по обе стороны от ВШП (рис. 2) [1], [2].

При экспериментальном исследовании параллелограмм Роберваля подвешивается к неподвижной опоре за верхнее отверстие, к нижнему отверстию крепится регулируемый груз. Под дей-

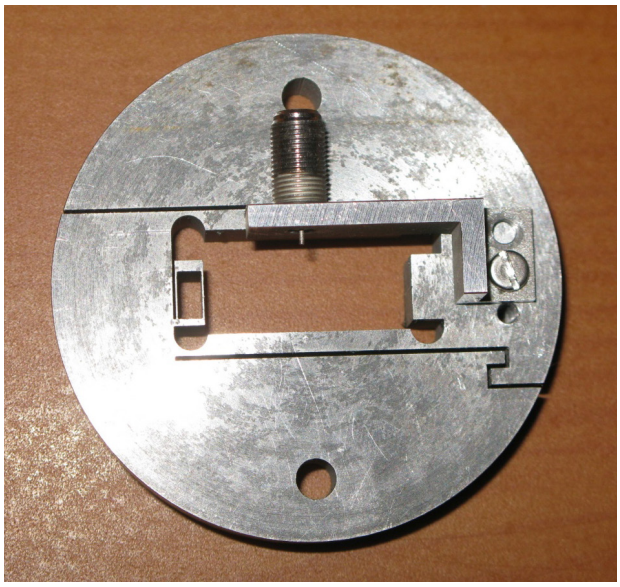


*Рис. 1. Конструкция датчика деформации (параллелограмм Роберваля)*

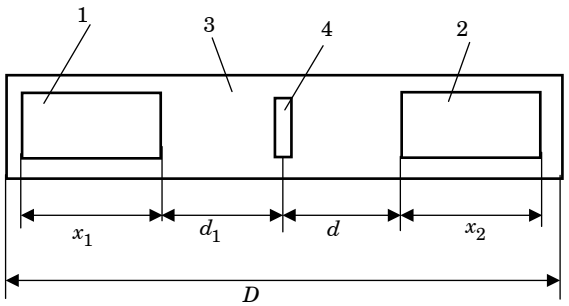



*Рис. 2. Основные топологические элементы ЧЭ и их размеры: 1, 2 – отражающие системы; 3 – пьезоплата; 4 – ВШП*

ствием груза конструкция изгибает пьезопластину. При этом скорость ПАВ ($V$) в пластине меняется. Параллелограмм Роберваля обеспечивает линейную зависимость изменения скорости ПАВ от деформации. Вследствие относительно небольших размеров деформированных областей, внутри которых производятся измерения, как изменение деформации, так и обусловленное им изменение скорости ПАВ в пространстве подложки $V(p)$ можно считать линейно зависимыми от координаты подложки (рис. 3):

$$V(p) = V_0 + \frac{\Delta V}{D} p, \qquad (1)$$

где $\Delta V$ – разность скоростей на краях деформированной подложки; $D$ – длина подложки ЧЭ.

Значение величины $\Delta V$ определяет изменение функции $V(p)$ в пространстве подложки ЧЭ

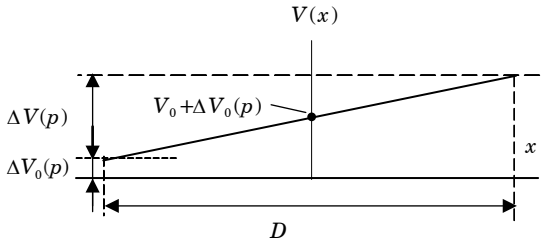



*Рис. 3. Изменение скорости ПАВ при деформации пьезоплаты ЧЭ*

и поэтому может использоваться в качестве параметра деформации.

Считывание информации о деформированном состоянии подложки ЧЭ производится с помощью запросного сигнала ($U_г$), который подводится к ВШП и преобразуется в акустические импульсы ПАВ, распространяющиеся по поверхности подложки в обе стороны от преобразователя в направлении отражающих структур. После отражения акустические импульсы возвращаются к ВШП и в результате синфазного суммирования формируют информационный электрический сигнал $U_{инф}$. Деформация подложки вызывает не одинаковое изменение скорости распространения импульсов по подложке. Характер суммирования зависит от деформации подложки и скорости прохождения импульсами расстояния от ВШП до краев ОС и обратно. Нужно заметить, что задержка сигнала происходит как на свободной поверхности подложки (на пути импульса от ВШП до ОС), так и при движении импульса внутри ОС.

В исследуемом ЧЭ применялся ВШП с двумя эквидистантными прореженными отражательными структурами и с синфазным суммированием отраженных волн. Запросный сигнал – прямоугольный радиоимпульс с постоянной частотой заполнения.

При синфазном суммировании отраженных волн отсутствию деформации соответствует максимальная величина информационного сигнала $U_{инф}$. С появлением деформации пиковое значение $U_{инф}$ уменьшается. Зависимость пикового значения информационного сигнала $U_{макс}$ от параметра деформации $\Delta V$ можно считать основной характеристикой чувствительного элемента и с ее помощью определять диапазон действия, чувствительность, точность и некоторые другие параметры исследуемого ЧЭ.

При использовании радиоканала, ЧЭ соединяется с антенной, которая участвует в переизлучении запросного сигнала. Пиковое значение

$U_{инф}$ зависит не только от параметра исследуемой деформации, но и от дальности от ЧЭ до запросного устройства (ридера). Предполагается, что ридер, излучающий запросный сигнал и принимающий переизлученный ЧЭ сигнал, находится на заранее не известном расстоянии от ЧЭ. Поэтому в данном разделе был предложен и исследован метод определения деформации с помощью ЧЭ, в котором использовались 2 узкополосных немодулированных радиоимпульса. Использование узкополосных радиосигналов позволило сузить рабочую полосу приемника ридера и работать при меньшем соотношении сигнал/шум. Это важно, так как устройство на ПАВ является пассивным устройством, а энергетические возможности ридера ограничены.

Для отработки метода определения деформации использовалась рассмотренная ранее математическая модель ЧЭ [3]–[6].

Установлено, что частотная зависимость коэффициента отражения прореженной ОС обладает характерной особенностью: наличием побочных лепестков. Кроме основного лепестка, на расчетной частоте ($F_0$ = 433 МГц) имеется ряд побочных лепестков, максимальные значения и средние частоты которых определяются количеством секций в ОС, длиной $L_c$ секции и количеством $L_1$ канавок в секции.

На рис. 4 и 5 представлены частотные зависимости коэффициентов отражения: на рис. 4 – левой/правой ОС (по отдельности), а на рис. 5 – при совместной работе обеих ОС, имеющих параметры $L_c$ = 50. $L_1$ = 20, $N_c$ = 16, расстояние $d_0$ от центра ВШП до края ближайшей ОС $d_0$ = 800 $\lambda_0$, глубина канавки $h$ = 1000 Å (ангстрем).

Важно отметить, что при совместной работе двух ОС с поочередным прореживанием в недеформированной подложке нечетные лепестки в частотной характеристике коэффициента отражения $R(f)$ всего устройства исчезают (рис. 5). Это обусловлено особенностью совместного отражения акустических волн от двух прореженных решеток.

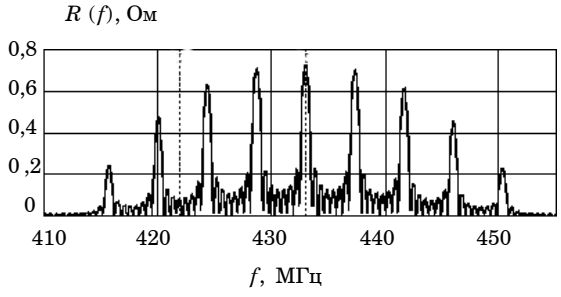



*Рис. 4. Частотная характеристика левой/правой отражающих решеток ЧЭ*

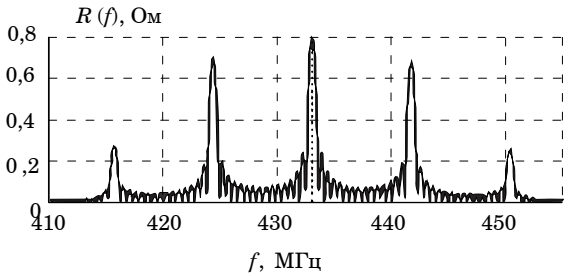



*Рис. 5. Частотная характеристика совместно работающих отражающих решеток ЧЭ*

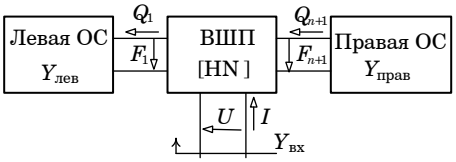



*Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема ЧЭ*

Эквивалентная электрическая схема ЧЭ может быть представлена рис. 6.

Как показано в [7]–[9], входная проводимость ЧЭ может быть выражена в форме:

$$Y_{вх} = H_{33} + \frac{(H_{23} - Y_{лев}H_{31})(H_{31} - Y_{прав}H_{32})}{Y_{лев}H_{11} + Y_{прав}H_{22} - Y_{лев}Y_{прав}H_{12} - H_{21}}, \quad (2)$$

где $H_{11}$, $H_{12}$, $H_{13}$, $H_{21}$, $H_{31}$, $H_{32}$, $H_{33}$ – коэффициенты матриц, моделирующих $Y$вх ВШП; $Y_{лев}$ и $Y_{прав}$ – входные проводимости левой и правой отражающих структур.

Эти элементы матриц зависят от параметров эквивалентной схемы преобразователя и его топологии. Поэтому, выбрав материал подложки, количество электродов и геометрические размеры топологии ВШП, удалось получить желаемое значение параметра $Z_{вх} = 1/Y_{вх}$ на расчетной частоте $f_0$ = 433МГц: $Z_{вх} = R_{вх}(f_0) + jX_{вх}(f_0) = 50 + j_0$ – чисто активное и равное 50 Ом входное сопротивление ВШП на расчетной частоте. Значения $R_{вх}(f)$ и $X_{вх}(f)$ ВШП с ОС в диапазоне частот $f$ =(415–460) МГц изображены на рис. 7*а*, *б*).

Чувствительный элемент представляет собой двухполюсник, частотная характеристика которого определяется и частотной характеристикой коэффициента отражения ОС, и акустоэлектронной частотной характеристикой ВШП. Последняя определяет преобразование в ВШП электрической энергии в акустическую. На рис. 8 показаны обе эти характеристики.

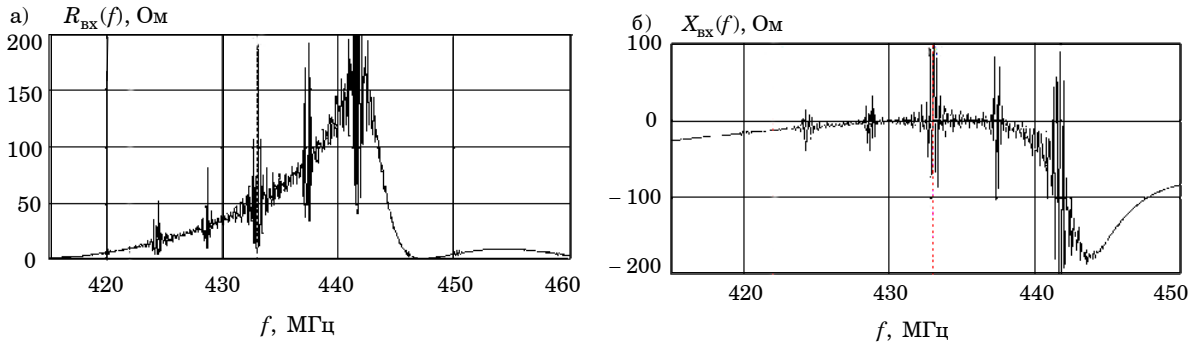



*Рис. 7. Частотные зависимости составляющих входного сопротивления ВШП с ОС: а – $R_{вх}(f)$; б – $X_{вх}(f)$*

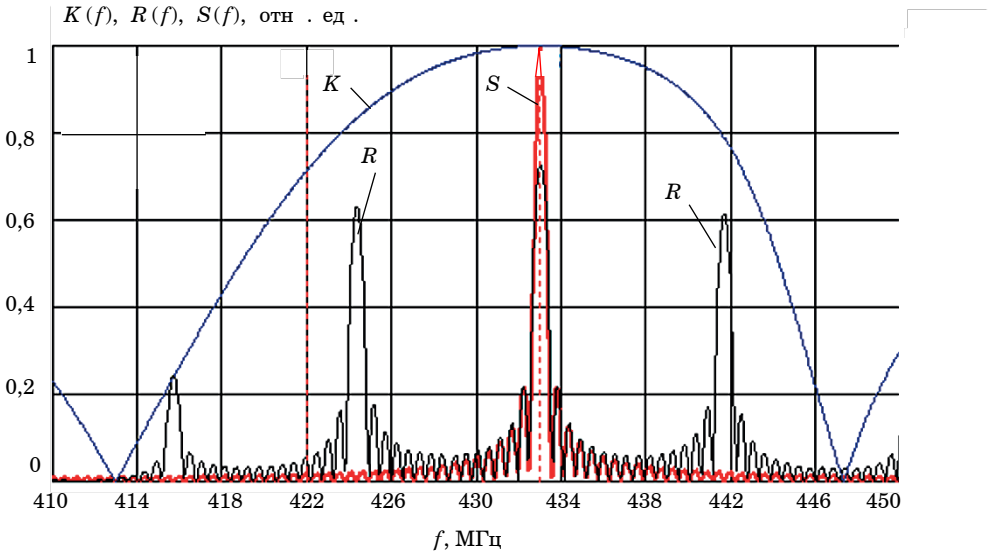



*Рис. 8. Частотные характеристики ЧЭ: K(f) – акустоэлектронная характеристика ВШП; R(f) – характеристика ОС; S(f) – амплитудный спектр запросного сигнала*

При вычислении напряжения $U_{ЧЭ}$, возникающего на ЧЭ при воздействии сигналов запроса, использована схема подключения, приведенная на рис. 9 [10]–[12].

Схема содержит источник сигнала с напряжением $U_г$ и комплексным сопротивлением $= R_г + jX_г$ (в нашем варианте антенна с внутренним сопротивлением $Z_г$), согласующий элемент $L$ и ЧЭ с комплексным сопротивлением $Z_{вх} = R_{вх} + jX_{вх}$.

Если $Z_г = R_г$, то согласующий элемент необходим для компенсации реактивных составляющих в сопротивлении $Z_{вх}$, что способствует увеличению амплитуды напряжения на ЧЭ. Если $Z_г$ и $Z_{вх}$ чисто активные, то элемент $L$ не требуется ($L = 0$).

Используя схему рис. 9, можно найти спектральную функцию напряжения на чувствительном элементе в следующем виде:

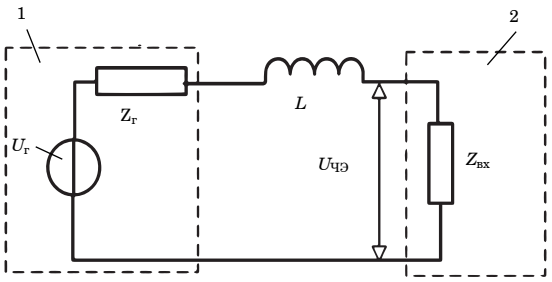



*Рис. 9. Схема подключения ЧЭ к источнику сигнала запроса: 1 – источник сигнала запроса; 2 – чувствительный элемент*

$$S_{ЧЭ} = \frac{S_Г \cdot Z_{вх}}{Z_г + Z_{вх} + 2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot L}, \qquad (3)$$

где $S_{ЧЭ}$ – спектральная функция напряжения на чувствительном элементе; $S_г$ – спектральная функция сигнала запроса.

Мгновенное значение напряжения $U_{ЧЭ}$ на чувствительном элементе вычисляется посредством обратного преобразования Фурье функции $S_{ЧЭ}$.

Сигнал $U_{ЧЭ}$ на входном сопротивлении ЧЭ содержит в своем составе информационный сигнал $U_{инф}$, образованный синфазным суммированием отраженных волн и несущий информацию о параметрах деформации подложки ЧЭ. Однако кроме информационного сигнала составляющими $U_{ЧЭ}$ всегда являются также, во-первых, запросный сигнал $U_г$, непосредственно подключаемый к ВШП при работе в режиме излучения-приема, и, во-вторых, составляющие $U_{отр}$, обусловленные вторичными отражениями ПАВ между двумя ОС и ВШП. Поэтому

$$U_{ЧЭ} = U_г + U_{инф} + U_{отр}. \quad (4)$$

При использовании радиоканала приемник ридера запирается на время излучения запросного сигнала. Поэтому $U_г$ недоступно для измерения. $U_{отр}$ является сигналом-помехой и не учитывается при анализе. Информация о деформации заключена в $U_{инф}$. Но, как указывалось ранее, амплитуда этого сигнала зависит и от дальности до ЧЭ. Для пояснения способа определения деформации с использованием $U_{инф}$ (для исключения зависимости от дальности) проведем расчет и анализ частотной характеристики коэффициента отражения ОС при изменении деформации.

Результаты расчетов по указанной модели ЧЭ приведены на рис. 10–13. Одновременно на этом рисунке показаны частотная характеристика ВШП и амплитудный спектр $S(f)$ запросного сигнала.

На рисунках видно, что при отсутствии деформации ($dV/V_0 = 0$), частотная характеристика ОС в рассматриваемом частотном диапазоне состоит из одной спектральной составляющей, имеющей максимальную величину на центральной частоте, совпадающей с расчетной частотой $f_0 = 433$ МГц (рис. 10*а*, *б*).

На рис. 10*в*, *г* показаны частотные характеристика ОС при $dV/V_0 = 0.0003$. При увеличении деформации ($dV/V_0 > 0$) слева и справа от главного лепестка частотной характеристики ОС появляются боковые лепестки (рис. 10*в*). При выбранной топологии ($L_c = 50$, $L_1 = 20$, $N_c = 16$, $d_0 = 800\ \lambda_0$, $N_1 = 51$, $W = 489$ мкм) их максимальные значения будут расти по мере роста деформации, а максимальное значение главного лепестка будет падать.

Если облучать ЧЭ радиоимпульсом такой же частоты, то $U_{инф}$ будет иметь максимальное значение. Вид сигнала показан на рис. 11*а*.

При максимальной деформации (в приводимом примере $dV/V_0 = 0.00064$) значение главного лепестка ОС на расчетной частоте будет минимальным (рис. 12*а*), а боковые лепестки до-

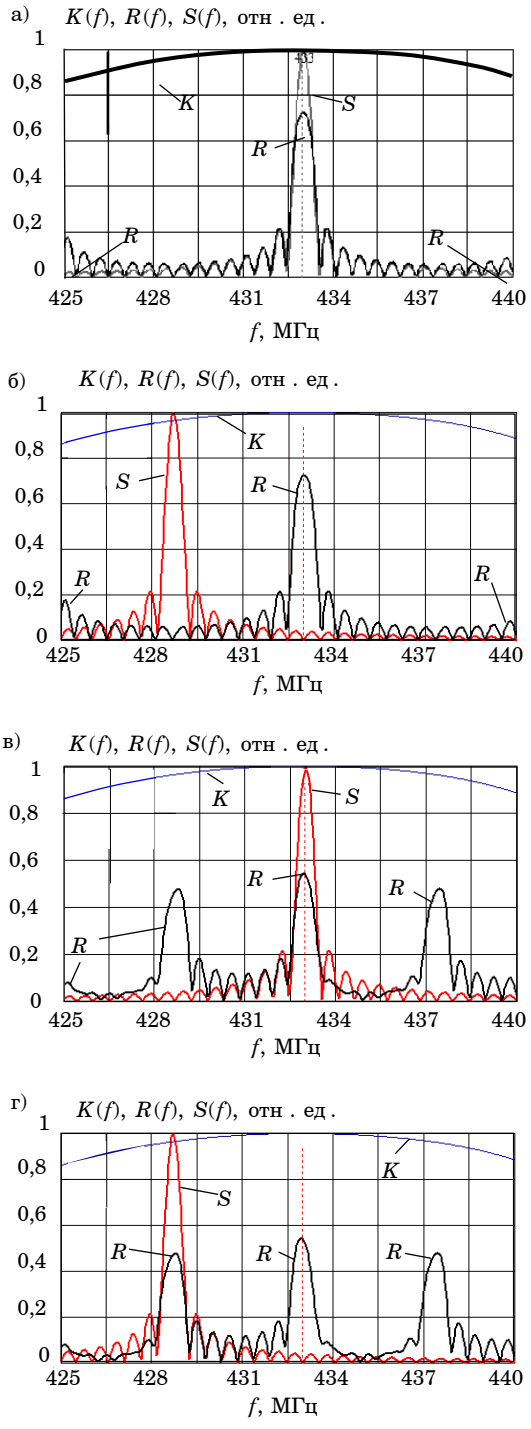



*Рис. 10. Частотная характеристика ЧЭ: K – ВШП, R – ОС, S – нормированный амплитудный спектр запросного сигнала; а – $f_0 = 433$МГц; $dV/V_0 = 0$; б – $f_{нб} = 428.7$ МГц; $dV/V_0 = 0$; в – $f_0 = 433$МГц; $dV/V_0 = 0.0003$; г – $f_{нб} = 428.7$ МГц; $dV/V_0 = 0.0003$*

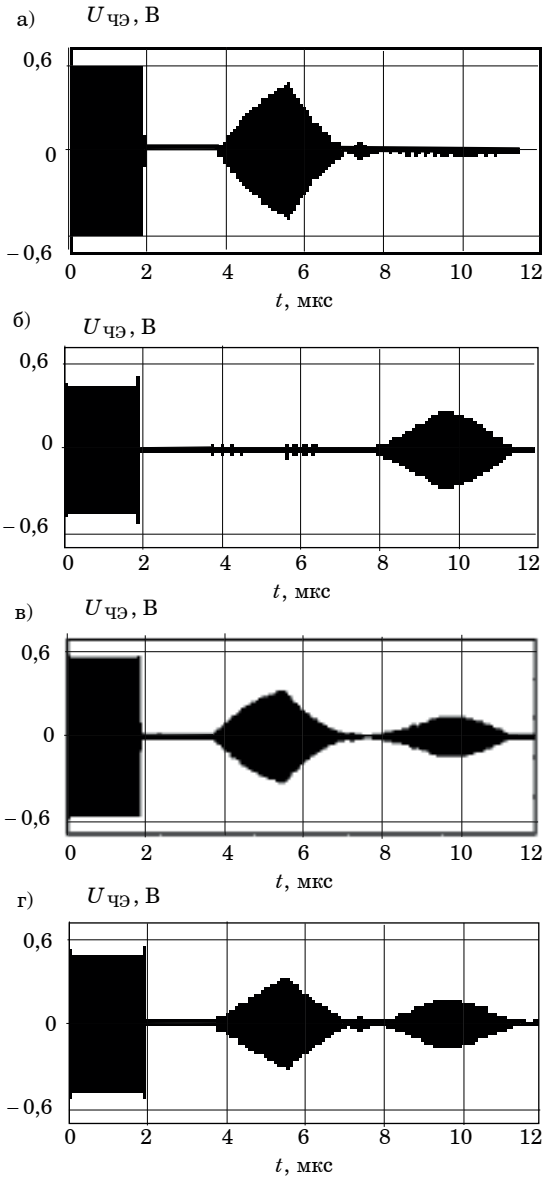



*Рис. 11. Вид информационного сигнала: $dV/V_0$ =0; сигнал запроса; а – $f_0$ = 433 МГц; $dV/V_0$ = 0; б – $f_{нб}$ = 428.7МГц; $dV/V_0$ = 0; в – $f_0$ = 433 МГц; $dV/V_0$ = 0.0003; г – $f_{нб}$ = 428.7МГц; $dV/V_0$ = 0.0003*

стигнут своего максимального значения. При этом $U_{инф}$ будет минимальным (рис. 13*а*).

С ростом деформации, при облучении ЧЭ радиоимпульсом с $f_0$ = 433 МГц, $U_{инф}$ на $f_0$ будет падать, а если облучать радиоимпульсом с центральной частотой $f_{нб}$, то – расти. На рис. 11*в* показаны $U_{инф}(t)$ при $f_0$ = 433МГц, а на рис. 11*г* – при $f_{нб}$ = 428.7 МГц при $dV/V_0$ = 0.0003. При максимальной (для данной топологии) деформации $dV/V_0$ = 0.00064, $U_{инф}$ на $f_0$ будет минимальным, а $U_{инф}$ на $f_{нб}$ достигнет своего максимального значения (рис. 13*а*, *б* соответственно).

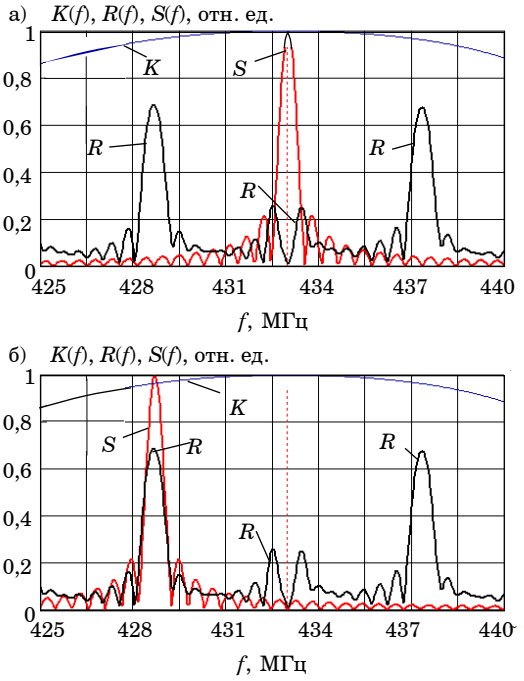



*Рис. 12. Частотная характеристика ЧЭ: К – ВШП; R – ОС; S – нормированный амплитудный спектр запросного сигнала; а – $f_0$ = 433 МГц; $dV/V_0$ = 0.00064; б – $f_{нб}$ = 428.7 МГц; $dV/V_0$ = 0.00064*

На приведенных рисунках видно, что при $dV/V_0$ = 0, если облучать ЧЭ сначала радиоимпульсом с частотой $f_0$, а затем с частотой $f_{нб}$ (частота нижнего бокового лепестка частотной ха-

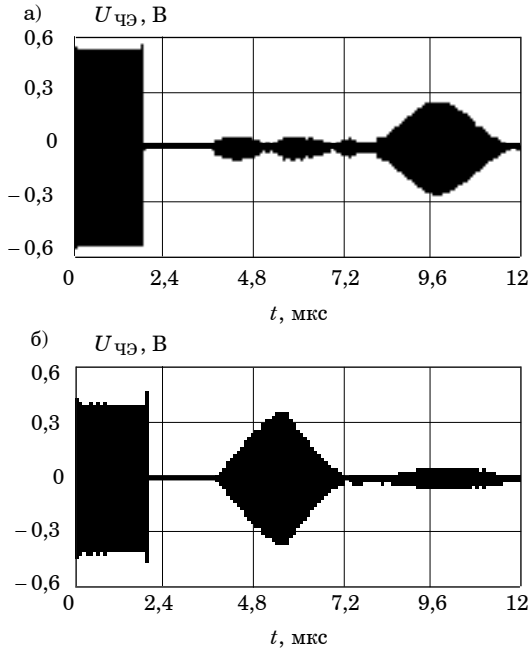



*Рис. 13. Вид информационного сигнала: а – $f_0$ = 433 МГц; $dV/V_0$ = 0.00064; б – $f_{нб}$ = 428.7 МГц; $dV/V_0$ = 0.00064*

рактеристики ОС), то при отсутствии деформации $U_{инф}$ будет максимальным на частоте $f_0$ и будет минимальным на частоте $f_{нб}$ (рис. 12*а*, *б* соответственно).

Если в таком же порядке облучать ЧЭ при $dV/V_0 = 0.00064$, то $U_{инф}$ будет минимальным на $f_0$ и максимальным на $f_{нб,}$ см. рис. 13, а и б соответственно. Таким образом, при отсутствии деформации (или малой деформации) $U_{инф}$ на частоте запросного сигнала $f_0$ будет больше $U_{инф}$ на частоте запросного сигнала $f_{нб}$. При определенной деформации (в нашем примере $dV/V_0$= =0,0003) величины $U_{инф}$ будут примерно равными на обеих частотах. При максимальной же деформации ($dV/V_0$ = 0,00064) $U_{инф}$ на частоте запросного сигнала $f_0$ будет меньше $U_{инф}$ на частоте запросного сигнала $f_{нб}$. Обозначим $U_{инф}$ на $f_0 = U_{макс}$, а $U_{инф}$ на $f_{нб} = U_{мин}$. Вычисленная зависимость

$$U_{инф} = \frac{U_{макс} - U_{мин}}{U_{макс}}, \qquad (5)$$

где $U_{макс} = U_{инф}$ на частоте $f_0$; $U_{мин} = U_{инф}$ на частоте $f_{нб}$ является линейной функцией от $dV/V_0$ (рис. 14).

Так как $U_{макс}$ и $U_{мин}$ в равной степени зависят от дальности, то только их различие при деформации исследуемого объекта служит мерой этой деформации.

Так в нашем примере при отсутствии деформации и при $dV/V_0 < 0.0003$ $U_{макс} > U_{мин}$.

При $dV/V_0 = 0.0003$ $U_{макс} \approx U_{мин}$.

При деформации в диапазоне 0,0003…0,00064 $U_{мин} > U_{макс}$. Значит, модуль соотношения (5) меняется от максимальной величины до минимальной. При увеличении деформации более чем 0,0003 соотношение (5) меняет знак на противоположный. Величина изменения деформации, недоступная для измерения, будет определяться уровнем шума на входе устройства обработки.

Соотношение (5) было проверено экспериментально. Источником запросных сигналов служил генератор прямоугольных радиоимпульсов, подаваемых на вход ЧЭ. Результат эксперимента приведен на рис. 15.

В эксперименте деформация имитировалась нагрузкой параллелограмма Роберваля гирьками указанных на рис. 15 величин. Получено достаточно хорошее совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей. Меньший диапазон измеренной деформации определялся прочностными свойствами подложки ЧЭ. Нагрузка более 1 кг приводила к разрушению исследуемого образца ЧЭ.

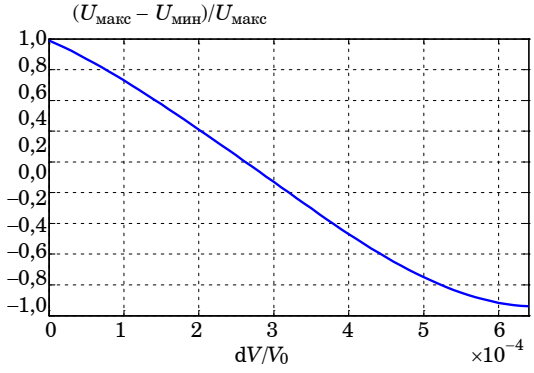



*Рис. 14. Расчетная зависимость соотношения (5) от относительного изменения скорости ПАВ в ЧЭ при деформации*

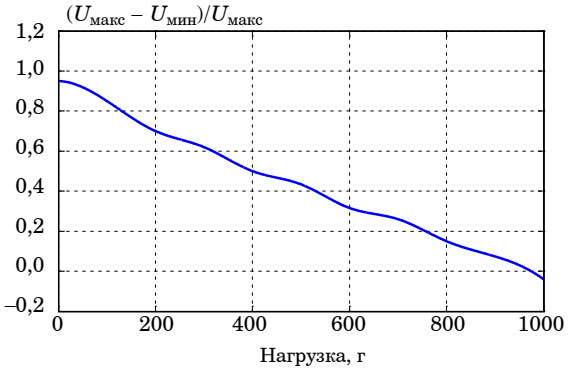



*Рис. 15. Экспериментальная зависимость соотношения (5.39) от нагрузки параллелограмма Роберваля*

## Библиографический список

1. *Зернов Н. В., Карпов В. Г.* Теория радиотехнических цепей. М.: Энергия, 1965.

2. *Атабеков Г. И.* Линейные электрические цепи. М.: Энергия, 1978.

3. *Koshiba M., Mitobe S.* Equivalent Networks for SAW gratings // IEEE Trans. on US, Ferroel., FC., 1988. Vol. 35. N 3.

4. *Inagawa K., Koshiba M.* Equiwalent Networks for SAW Interdigital transducers // IEEE Trans. on US, Ferroel., FC., 1993. Vol.41. No 3. P.402–411.

5. *Dunnrowicz C. F.S.T.P.* ReflectioN of Surfaces Waves from Periodic Discontinuities // Ultrasonic Simposium Proceedings. Vol. IEEE Cat., 1976. N 76. CH1120–5SU. P. 386–390.

6. *Li R., Melngailis J.* The Influence of Stored Energy at Step Discontinuities on the Behavior of Surface-Wave Gratings // IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics. 1975. Vol. SU–22. N 3. P. 189–198.

7. Беспроводной ПАВ-датчик znose. URL: https://www.estcal.com/solution/homeland-security (дата обращения: 15.01.2022).

**УДК 621.01** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-33**

***Х. Сяоян****
*доктор технических наук, профессор*
***В. В. Перлюк*****
*кандидат технических наук, доцент*
**Шэньянский политехнический университет*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЛЕРА ПРЯМОЙ СВЯЗИ

*В настоящей статье рассматривается возможность создания нечеткого регулятора момента нагрузки с прямой связью, чтобы уменьшить влияние изменения момента нагрузки на электрический привод. Во-первых, определяется выбор и параметры серводвигателя, а затем определяется математическая модель электропривода. Во-вторых, изучается принцип нечеткого управления и устанавливается модель нечеткого регулятора. Анализируется и проверяется работа нечеткого контроллера с прямой связью электрического исполнительного механизма. В результате показано, что комбинация нечеткого контроллера с прямой связью и системы управления с двойным замкнутым контуром электрического привода может улучшить способность электрического привода противодействовать нагрузке по крутящему моменту под действием момента нагрузки.*
***Ключевые слова:*** *электрический рулевой привод, широтно-импульсная модуляция, контроллер нечеткого управления.*

***H. Xiaoyang****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***V. V. Perliouk*****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# RESEARCH ON ONE KIND OF FEED FORWARD FUZZY CONTROLLER

*The magnitude of load torque, such as hinge torque, will change significantly due to the change of missile flight speed and steering gear deflection angle, which is not conducive to the missile electric steering gear maintaining its predetermined deflection angle and will seriously affect the flight trajectory of the missile. Therefore, we consider establishing a feedforward fuzzy controller of load torque to reduce the impact of load torque change on the electric actuator. Firstly, the selection and parameters of the servo motor are determined, and then the mathematical model of the electric actuator is determined. Secondly, the principle of fuzzy control is studied, and the fuzzy controller model is established. Finally, the performance of the feedforward fuzzy controller of the electric actuator is analyzed and verified. The result of the analysis is that the combination of feedforward fuzzy controller and electric actuator double closed-loop control system can improve the anti-load torque interference ability of electric actuator to a certain extent under the action of a specific range of load torque.*
***Keywords:*** *electric steering gear, PWM, fuzzy controller.*

## Введение

Электропривод ракеты – это исполнительный механизм системы управления полетом ракеты. Он играет решающую роль в том, сможет ли ракета выполнять различные поставленные летные задачи [1]. Ракета может лететь по заданной орбите в воздухе благодаря рулевому механизму, который заставляет рулевую поверхность отклоняться для изменения курса ракеты [2]. Процесс отклонения поверхности руля направления заключается в выдаче команд отклонения от компьютера в механизме управления полетом. Затем контроллер руля направления получает мощность для поворота руля направления, чтобы управлять отклонением поверхности руля для изменения состояния навигации самолета в воздухе и управления траекторией полета самолета [3].

Величина крутящего момента нагрузки, например крутящий момент шарнира, значительно изменится из-за изменения скорости полета ракеты и угла отклонения рулевого механизма, что не способствует тому, что электрический

рулевой привод ракеты поддерживает заданный угол отклонения, и серьезно влияет на траекторию полета ракеты. Поэтому мы рассматриваем возможность создания нечеткого регулятора момента нагрузки с прямой связью, чтобы уменьшить влияние изменения момента нагрузки на электрический привод. Сначала определяется выбор и параметры серводвигателя, а затем определяется математическая модель электропривода. Изучается принцип нечеткого управления и устанавливается модель нечеткого регулятора. Наконец, анализируется и проверяется работа нечеткого контроллера с прямой связью электрического исполнительного механизма [4]–[7]. Результатом анализа является то, что комбинация нечеткого контроллера с прямой связью и двойной замкнутой системы управления электропривода может в некоторой степени улучшить способность электропривода к помехам крутящего момента антинагрузки под действием определенного диапазона крутящего момента нагрузки. В связи с тем, что электрическая плита руля направления ракеты подвергается значительному изменению крутящего момента нагрузки во время полета из-за изменений скорости полета и характеристик воздуха, добавлен нечеткий контроллер прямой связи для улучшения характеристик помехоустойчивости электрического крутящего момента.

## Привод

Сравнивая параметры различных типов двигателей, бесщеточный двигатель постоянного тока окончательно определяется как серводвигатель системы рулевого управления. В данной статье анализируется математическая модель электропривода, определяется математическая модель электропривода в сочетании с выбранными параметрами бесщеточного двигателя постоянного тока и формируется двойная замкнутая система управления электроприводом. Генерируется нечеткий контроллер с прямой связью электрического исполнительного механизма. Смоделированы и проанализированы противогрузочные характеристики двойной замкнутой системы управления электроприводом с нечетким контроллером с прогнозированием и простой двойной замкнутой системы управления электроприводом. Результаты моделирования показывают, что нечеткий контроллер с прогнозированием положительно влияет на помехи противодействующего крутящего момента подъемной системы в пределах определенного диапазона крутящего момента нагрузки.

## Разработка модели электропривода

В этой статье в качестве электрического привода используется бесщеточный двигатель постоянного тока, который в основном состоит из усилителя мощности с ШИМ, серводвигателя, энкодера, потенциометра и редуктора [8]–[10]. На рис. 1 ниже показана структурная схема системы электрического привода.

Уравнение баланса однофазных напряжений двигателя постоянного тока выглядит следующим образом:

$$u_a = r \times i_a + (L - M)\frac{di_a}{dt} + e_a. \quad (1)$$

Уравнение обратной ЭДС:

$$e_a = K_e \omega. \quad (2)$$

В приведенной формуле $u_a$ – фазное напряжение ротора, которое измеряется в Вольтах; $r$ – полное сопротивление якоря, которое измеряется в Омах; $i_a$ – ток якоря, который измеряется в Амперах; $L$-$M$ – полная индуктивность якоря, которая измеряется в Генри; $e_a$ – обратная электродвижущая сила двигателя, которая измеряется в Вольтах; ω – угловая скорость вращения вала двигателя, которая измеряется

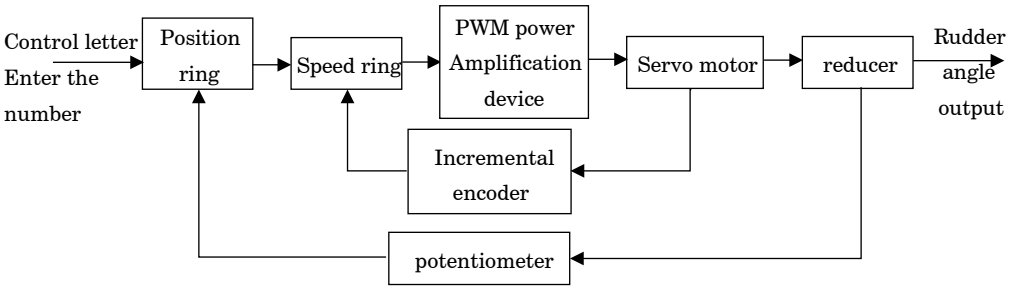



*Рис. 1. Структурная схема системы рулевого управления*

в рад/сек; $K_e$ – постоянная обратной электродвижущей силы, которая измеряется в Вольт*секунды/радиан.

Кроме того, электромагнитный момент двигателя составляет:

$$T_e = P(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega. \quad (3)$$

Уравнение движения двигателя:

$$T_e - T_i - B\omega = J\frac{d\omega}{dt}. \quad (4)$$

Для однофазных мы можем получить:

$$T_e = K_t i_d, \quad (5)$$

где $P$ – количество полюсов двигателя; полный крутящий момент на валу двигателя, ед: Нм; $T_i$ – момент нагрузки на валу двигателя, ед; Нм; $J$ – полный момент инерции, преобразованный на вал двигателя, ед.; кг·м$^2$; $K_t$ – коэффициент крутящего момента, ед Нм/А; $B$ – коэффициент демпфирования [11]–[13].

## Метод проектирования нечеткого регулятора

*Нечеткость ввода*

Если диапазон значений внешней входной переменной равен, $[-A, A]$ а внутренний входной домен равен $\{-m, -m+1, ..., 0, ..., m-1, m\}$, коэффициент квантования равен:

$$Kl = m / A. \quad (6)$$

Коэффициент квантования ошибки $e$ нечеткой системы управления с прямой связью $K_e = 0.3$, равен коэффициенту изменения ошибки $e_c$ Коэффициент квантования $K_{e_c} = 0.2$.

*Разработка базы данных*

База данных содержит функции принадлежности, выходные нечеткие множества и другую информацию. Мы будем использовать ошибку угла поворота руля $e$ и скорость изменения ошибки угла поворота руля $e_c$ в качестве входных и $u$ выходных переменных нечеткого контроллера.

Области погрешности отклонения руля направления и скорости изменения погрешности отклонения руля задаются следующим образом:

$$\{e\} = \{-3, -2, -2, 0, 1, 2, 3\}; \quad (7)$$

$$\{ec\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}. \quad (8)$$

Выберите нечеткие подмножества $e$ и $e_c$ выбранные из

$$\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\} = \{Negative\ Big, Negative\ Middle, Negative\ Small, Zero, Positive\ Small, Positive\ Middle, Positive\ Big\}. \quad (9)$$

Универсальные параметры выходной переменной $u$ is выбирается следующим образом:

$$\{u\} = \{-3, -2, -2, 0, 1, 2, 3\}. \quad (10)$$

Выбранные нечеткие подмножества $u$ находятся

$$\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}. \quad (11)$$

Функция принадлежности делит данные на нечеткие множества и объясняет процесс перехода различий. В этой статье кривые функции принадлежности входных переменных $e$ и $e_c$, и выходных переменных $u$ выбираются так, чтобы они подчинялись треугольному распределению. Треугольная функция принадлежности выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} 0, x \le a, c \le x \\ \dfrac{x-a}{b-a}, a \le x \le b, \\ \dfrac{c-x}{c-b}, b \le x \le c \end{cases} \quad (12)$$

где $a$, $b$, $c(a < b < c)$ – значения абсцисс треугольных функций принадлежности. Кривая функции принадлежности входной переменной $e$ показана на рис. 2.

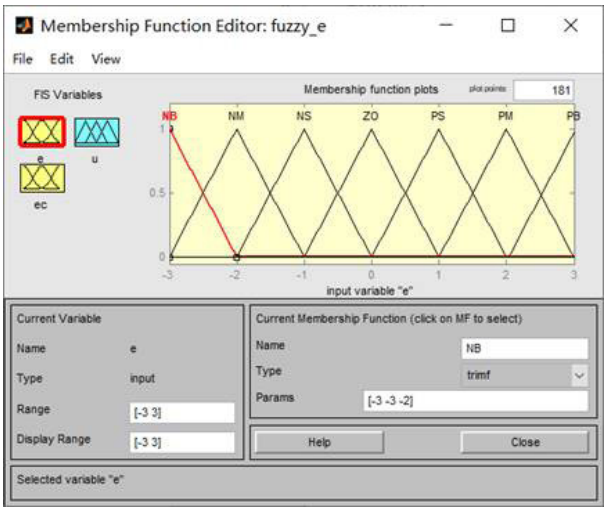



*Рис. 2. Вход в кривую функции принадлежности переменной e*

*Формулирование базы правил*

Распространенные выражения нечетких правил:

$$\begin{aligned} &If\ x = A_1\ and\ y = B_1, Then\ u = C_1 \\ &If\ x = A_2\ and\ y = B_2, Then\ u = C_2 \\ &\cdots\cdots \\ &If\ x = A_m\ and\ {}_y = B_m, Then\ u = C_m \end{aligned} \quad . \qquad (13)$$

Среди них $x$ и $y$ являются нечеткими входами, $A_i$ и $B_i\left(i = 1,2,3,\cdots,p\right)$ являются нечеткими подмножествами в нечеткой входной совокупности $x$ и входной совокупностью, $u$ являются нечеткими выходными данными, $C_i\left(i = 1,2,3,\cdots,q\right)$ – нечеткими подмножествами в выходной совокупности.

Согласно экспертному опыту и знаниям теории управления окончательные правила контроля приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Правила нечеткого управления**

| $e$ | $e_c$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM | NB | NB | NS | NS | NS | ZO | PS |
| NS | NB | NM | ZO | ZO | ZO | PS | PS |
| ZO | NM | NS | ZO | ZO | ZO | PS | PM |
| PS | NS | NS | ZO | ZO | PS | PM | PB |
| PM | ZO | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB | ZO | PS | PM | PM | PB | PB | PB |

Поверхностная диаграмма отношений ввода-вывода нечеткого контроллера показана на рис. 3.

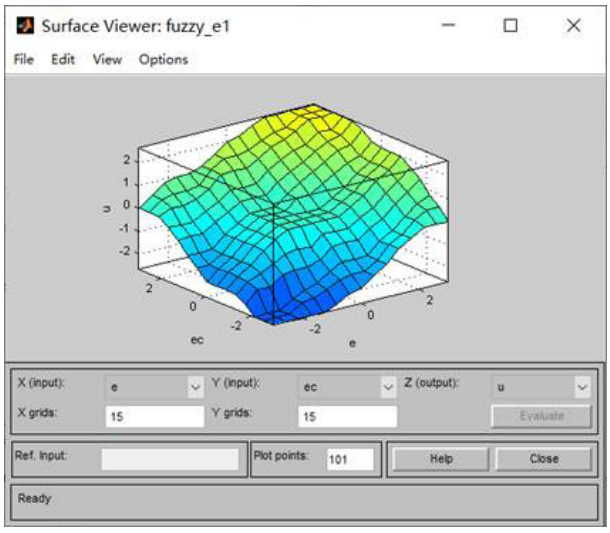



*Рис. 3. Поверхностная диаграмма отношения ввода-вывода нечеткого контроллера*

## Анализ моделирования нечеткого регулятора с прямой связью

Во-первых, введите команду отклонения прямого отклонения 1 ° на электрический привод и загрузите момент нагрузки прямого шага 10 нм в систему электрического привода при 0,2S. Крутящий момент нагружается на двойную замкнутую систему управления электрического исполнительного механизма и электрическую исполнительную систему с нечетким контроллером прямой связи соответственно. Кривые отклика двух систем получены путем моделирования, как показано на рис. 4.

На рисунке показано, что характеристики управления двойной замкнутой системы электропривода с исполнительным механизмом без нагрузки близки к характеристикам управления двойной замкнутой системы исполнительного механизма с нечетким контроллером с упреждением. Когда момент нагрузки шага вперед добавляется через 0,2 секунды, угол отклонения поверхности руля направления двойной замкнутой системы управления рулевым механизмом сильно изменяется, и резко ухудшаются характеристики. Поверхность руля направления имеет коэффициент отклонения 29,5 % под влиянием момента нагрузки. Наконец, время восстановления лопасти руля до заданного угла отклонения составляет 0,090 с, и в процессе восстановления лопасти руля отсутствуют колебания. Когда такой же момент нагрузки добавляется к системе управления с двойным замкнутым контуром исполнительного механизма с нечетким контроллером с прямой связью, его производительность значитель-

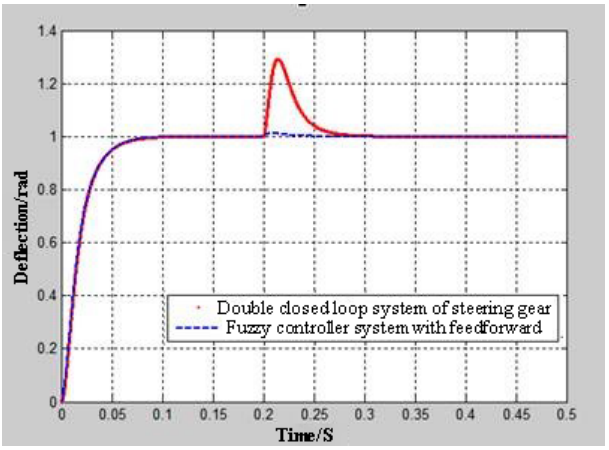



*Рис. 4. Кривая ступенчатой характеристики рулевого механизма при поступательном шаге нагрузки крутящего момента*

но улучшается по сравнению с простой системой управления с двойным замкнутым контуром с электрическим исполнительным механизмом. При добавлении того же момента нагрузки степень отклонения угла отклонения руля направления составляет 1,2 %, время восстановления руля направления до исходного угла составляет 0,038 с, и в процессе восстановления руля направления двух систем электроприводов отсутствуют колебания. Сравнивая два набора данных, мы можем сделать вывод, что нечеткий контроллер с прямой связью в системе электрического актуатора может значительно улучшить антинагрузочные характеристики и стабильность системы при добавлении того же момента ступенчатой нагрузки, когда система актуатора работает стабильно по сравнению с системой актуатора. без нечеткого контроллера с прямой связью. Он может эффективно уменьшить угловое отклонение пера руля, вызванное крутящим моментом нагрузки, и сократить время, необходимое перу руля системы рулевого управления, чтобы восстановить исходный угол.

Точно так же введите команду отклонения с положительным отклонением на 1 ° на электрический привод и загрузите отрицательный момент ступенчатой нагрузки 10 нм в систему электрического привода при 0,2 сек. Реакция контура положения двух систем и кривая изменения угла отклонения рулевого механизма в ответ на влияние крутящего момента нагрузки получены путем моделирования, как показано на рис. 5.

Как видно из рисунка, когда крутящий момент нагрузки обратного шага добавляется после того, как двойная замкнутая система управления электропривода достигает стабильного рабочего состояния, угол отклонения двойной замкнутой системы управления электропривода отклоняется примерно на 29,5 %. по сравнению с заданным углом отклонения. Время восстановления руля направления до заданного угла отклонения составляет 0,093 с. Когда тот же самый момент нагрузки загружается в двойную замкнутую систему управления электрического привода с нечетким контроллером с прямой связью, степень отклонения угла отклонения руля направления составляет всего 1,2 %, а время восстановления руля направления на исходный угол составляет 0,038 с. Можно сделать вывод, что нечеткий контроллер с прямой связью может значительно улучшить сопротивление ступенчатой нагрузке электрического исполнительного механизма.

Введите команду отклонения с положительным отклонением на 1 ° для электрического привода и загрузите крутящий момент нагрузки с отрицательным наклоном, когда система электрического привода работает в течение 0,2 сек. Крутящий момент нагружается на двойную замкнутую систему управления электрического исполнительного механизма и электрическую исполнительную систему с нечетким контроллером прямой связи соответственно. Кривые отклика двух систем получены путем моделирования, как показано на рис. 6.

Как видно из рисунка, после добавления ступенчатой нагрузки двойная замкнутая система управления электроприводом имеет погрешность отклонения через 0,2 сек., а угол отклонения руля направления остается стабильным на

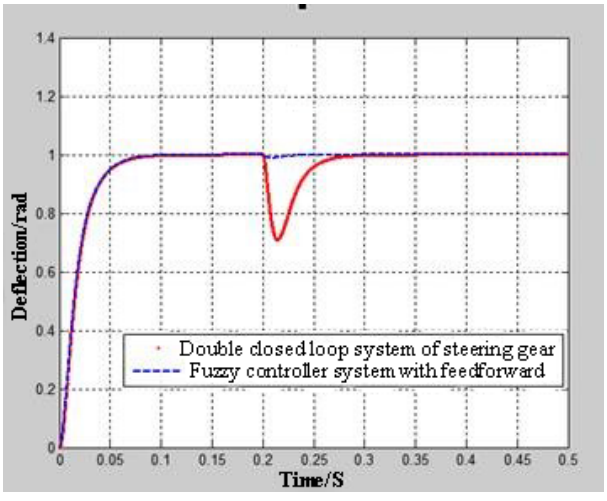



*Рис. 5. Кривая ступенчатой характеристики рулевого механизма при отрицательной ступенчатой нагрузке*

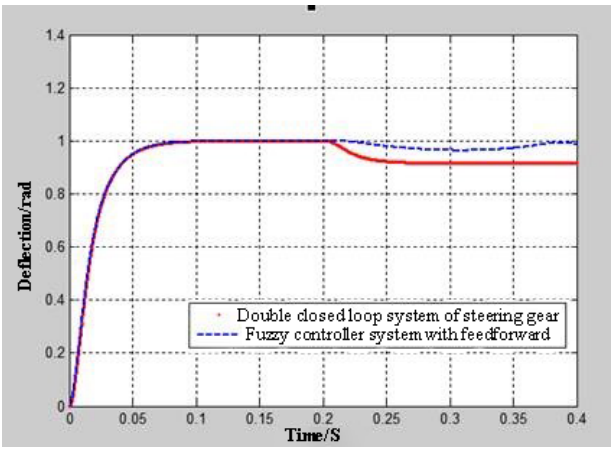



*Рис. 6. Ступенчатая характеристика рулевого механизма при отрицательной наклонной нагрузке*

уровне 0,92°. Система не может исправить, что приводит к статической ошибке. Погрешность угла поворота руля направления системы электропривода с нечетким контроллером с прямой связью значительно ниже, чем у системы электропривода с простым двойным замкнутым контуром управления. Угол поворота руля постепенно возвращается в состояние без момента нагрузки через 0,3 сек. Следовательно, нечеткий контроллер с прямой связью также играет важную роль в реакции электрического исполнительного механизма на крутящий момент нагрузки в виде наклона.

## Заключение

Путем сравнения кривых отклика контура положения двойной замкнутой системы управления электропривода с нечетким контроллером с прогнозированием и простой двойной замкнутой системы управления электроприводом при нескольких различных формах нагрузки крутящим моментом. Наконец, сравнивая различные кривые производительности двух систем, можно сделать вывод, что нечеткий контроллер с прямой связью играет положительную роль в сопротивлении различным формам помех крутящего момента нагрузки в определенном диапазоне крутящего момента нагрузки.

### Библиографический список

1. *Hong L.* Design and implementation of aircraft electric actuator system [D]. Master's thesis of Harbin Engineering University. 2012.

2. *Mingfeng L.* Research on high dynamic electric actuator [D]. Master's thesis of Nanchang aviation university. 2017.

3. *Wang L.* Dynamic simulation of high-speed aircraft electric actuator servo system [D]. Master's thesis of Harbin University of technology. 2013.

4. *Guo H., Wang W., Xing W.* Design of Electrical/ Mechanical Hybrid 4-Redundancy Brushless DC torque Motor [J]. Chinese Journal of Aeronautics (English Edition), 2010. 23 (2). P. 211–215.

5. *Qiong L., Lichun Y., Chenfang S.* Design of servo system using brushless DC motor [J]. Communication world, 2016 (13). P. 262–263.

6. *Wang Z.* Nonlinear fuzzy PID control of electric actuator [D]. Master's thesis of University of Chinese Academy of Sciences. 2015.

7. *Hongjun L.* Design of electric analog actuator based on fuzzy control algorithm [D]. Master's thesis of Jilin University. 2018.

8. *Yan Z., Yangkuan G., Lianqing Z.* Simulation Research on Fuzzy PID closed-loop control system of stepping motor [J]. Modern electronic technology, 2015 (11). P. 44–49.

9. *Huijun L.* Design and optimization of fuzzy PID autopilot [D]. Dalian Maritime University, 2017.

10. *Aiwen W.* Development of fuzzy control algorithm based on Siemens S7–300 PLC [D]. North China Electric Power University, 2016.

11. *Jiang H., Shuyu P., Wen H.* Application of fuzzy neural network PID in digital steering gear control [J]. Computer measurement and control, 2016. 24 (10). P. 79–81.

12. *Wang S., Shi Y., Feng Z.* Research on control method based on Fuzzy PID controller [J]. Mechanical science and technology, 2011. 30 (1). P. 166–172.

13. *Anke X., Dongliang P., Xueting C.* Principle of automatic control [M]. Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2004 (06).

**УДК 621.396.96**

***А. А. Тарасенков****
*старший преподаватель*
***А. А. Монаков****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ВЫБОР ЗАКОНА ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ РАДИОВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ ФАПЧ

*В статье исследуется влияние закона частотной модуляции на точность радиовысотомера малых высот, в котором используется измерительный контур фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ). Для анализа использована математическая модель сигнала, отраженного от цилиндрической шероховатой поверхности. Рассмотрены три варианта закона модуляции: гармонический, несимметричный и симметричный пилообразный. Полученные результаты позволяют выявить особенности работы радиовысотомера при каждом типе модуляции. Лучшие результаты показал гармонический закон изменения частоты излучаемого сигнала. Причиной этого является отсутствие у сигнала биений зон обращения фазы и разрывов мгновенной частоты.*
***Ключевые слова:*** *радиовысотомер малых высот, фазовая автоматическая подстройка частоты.*

***A. A. Tarasenkov****
*Senior Lecturer*
***A. A. Monakov****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace instrumentation*

# FREQUENCY MODULATION SURVEY IN LOW RANGE FMCW RADAR ALTIMETER WITH PLL ESTIMATOR

*The article examines the influence of the frequency modulation law on the accuracy of a low-altitude radio altimeter, which uses a phase-locked loop (PLL). For the analysis, a mathematical model of the signal reflected from a cylindrical rough surface was used. Three types of the modulation law are considered: harmonic, asymmetric and symmetrical sawtooth. The obtained results reveal the peculiarities of the operation of the radio altimeter for each type of frequency modulation. The best results were shown by the harmonic law of change in the frequency of the transmitted signal. The reason for this is the absence in the beat signal of phase reversal zones and discontinuities of the instantaneous frequency.*
***Keywords:*** *low range radio altimeter, phase-locked loop.*

## Радиовысотомер с измерительным контуром ФАПЧ

Радиовысотомер (РВ) непрерывного излучения с контуром ФАПЧ в качестве измерителя относится к классу ЛЧМ радиовысотомеров малых высот [1] и подробно описан в [2].

Отличительной особенностью РВ является то, что для оценки информационного параметра (высоты) используется измерительный контур ФАПЧ [3], [4]. Петля фазовой автоподстройки организована таким образом, чтобы происходила настройка опорного сигнала $e_r^*(t)$ по сигналу биений $e_b(t)$, который получается на выходе смесителя приемника РВ.

Структурная схема измерительного контура ФАПЧ представлена на рис. 1. Контур состоит из: фазометра (ФМ), который реализует вычисление разности фаз $\Delta\Phi(t)$ сигнала биений и опор-

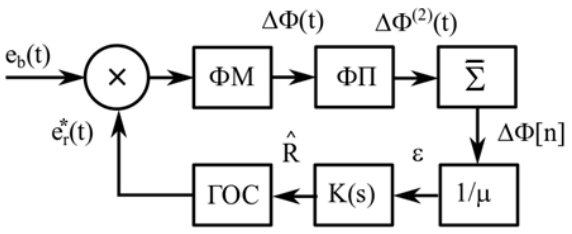



*Рис. 1. Структурная схема измерительного контура ФАПЧ*

ного сигнала; фазового преобразователя (ФП), выполняющего линеаризацию $\Delta\Phi(t)$ на периоде модуляции $T_m$; генератора опорного сигнала (ГОС); усредняющего сумматора $\overline{\Sigma}$, формирующего значение средней разности фаз на периоде $T_m$; масштабирующего преобразователя с коэффициентом передачи 1/μ; сглаживающего фильтра ФАПЧ $K(s)$, в состав которого входит интегрирующее звено нужного порядка астатизма.

Для исследования работы такой измерительной системы была использована математическая модель отражения радиосигнала от цилиндрической шероховатой поверхности [5], и создана программа в среде MatLab, позволяющая воспроизводить разные сценарии работы устройства и выполнять статистическую обработку результатов.

Целью настоящей статьи является выбор закона частотной модуляции излучаемого РВ сигнала на основе анализа влияния закона на точность оценки высоты.

## Модель отраженного сигнала

Выбранная цилиндрическая модель шероховатой отражающей поверхности (рис. 2) является компромиссом между точностью приближения модели к реальному рельефу земной поверхности и возможностью современных вычислительных ресурсов [5]. При данном подходе задача моделирования отраженного от поверхности сигнала из двухмерной превращается в одномерную, за счет возможности осуществить интегрирование методом стационарной фазы вдоль образующих цилиндрической поверхности в выражении для поверхностного тока, возбужденного падающим полем [6].

Допустим, что приемопередающее устройство неподвижно закреплено над цилиндрической шероховатой поверхностью на высоте $H$, а сама поверхность движется со скоростью $V$ относительно РВ. Тогда длина радиусвектора точки $M$ с координатами ($x$, $y$, ($x$+$Vt$)) этой поверхности составит:

$$R(t)=\sqrt{x^2+y^2+\left(H-\xi\left(x+Vt\right)\right)^2}\approx$$
$$\approx\sqrt{x^2+y^2+H^2}-\xi\left(x+Vt\right)\cos\theta,$$

где $H$ – геометрическая высота РВ; $V$ – скорость носителя РВ; $\xi(x)$ – случайная функция, описывающая шероховатость поверхности; $\xi$ – угол, под которым отражающая точка поверхности M видна из фазового центра антенны РВ. Время задержки отраженного от точки $M$ сигнала равно $\xi = 2R(t)/c$.

Если бы излученный сигнал представлял собой гармоническое колебание $\exp\left[i\omega t\right]d\omega$, частота которого равна $\xi$, то отраженный от поверхности и принятый антенной РВ сигнал был бы равен [5]:

$$E(t,\omega)d\omega=\frac{\pi k_w C}{(2\pi)^3 i}\int_S F^2\left(\hat{\mathbf{R}}\right)\frac{\exp\left[-2k_w R(t)\right]}{R^2}dSd\omega,$$

$k_w = \xi/c$ – волновое число; $C$ – коэффициент, зависящий от амплитуды излученной сферической волны, падающей на поверхность; $R$ – длина радиусвектора точки $M$; $dS$ – элемент площади поверхности; $F^2\left(\hat{\mathbf{R}}\right)$ – диаграмма направленности антенны источника сигнала в направлении единичного вектора $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{R}/R$.

Учитывая, что функция $\xi(x)$ не зависит от координаты $y$, осуществим в последнем уравнении интегрирование по этой переменной методом стационарной фазы [6]:

$$E(t,\omega)d\omega=-\frac{\sqrt{k_w}C}{8\pi^{3/2}}e^{i\pi/4}\times$$
$$\times\int_{-\infty}^{\infty}F^2(\theta)\frac{\exp\left[-i2k_w\rho\right]}{\rho^{3/2}}\exp\left[i2k_w\xi\left(x+Vt\right)\cos\theta\right]dxd\omega,$$

где $\rho=\sqrt{x^2+H^2}$, $\cos\xi = H/R$, $\sin\xi = x/R$. Тогда, учитывая, что спектр излученного сигнала $s(t)$ равен $S(\xi)$, принятый сигнал будет равен (1)

$$e(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}S(\omega)E(t,\omega)e^{i\omega t}d\omega=$$
$$=-\frac{\sqrt{k_w}C}{8\pi^{3/2}H^{3/2}}e^{i\pi/4}\times$$
$$\times\int_{-\infty}^{\infty}F^2(\theta)s\left(t-\frac{2}{c}\left[\rho-\xi\left(x+Vt\right)\cos\theta\right]\right)dx. \quad (1)$$

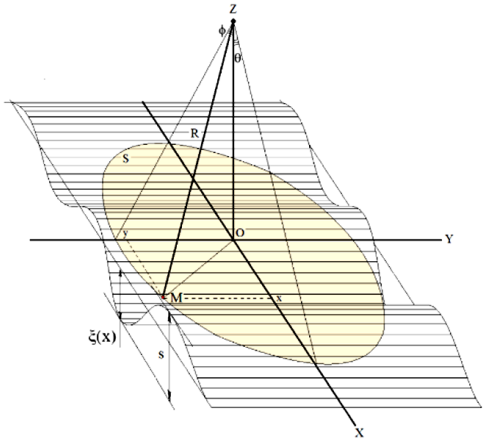



*Рис. 2. Цилиндрическая шероховатая отражающая поверхность*

При моделировании предположим, что случайная функция $\xi(x)$ является реализацией нормального случайного процесса с корреляционной функцией и спектральной плотностью мощности:

$$r(x) = s^2 \exp\left[-\left(\frac{x}{L}\right)^2\right],$$

$$G(\nu) = \sqrt{\pi} s^2 L \exp\left[-\frac{(\nu L)^2}{4}\right],$$

где $s$ – СКО высот шероховатостей поверхности; $L$ – радиус корреляции, а диаграмма направленности антенны РВ будет:

$$F(\theta) = \exp\left[-\alpha^2 \operatorname{tg}^2 \theta\right],$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \ln\left[\frac{2}{\operatorname{tg}^2(\theta_a / 2)}\right],$$

где $\theta_a$ – ширина диаграммы направленности антенны РВ по уровню половинной мощности.

Уравнение (1) является исходным для математического моделирования отраженного от цилиндрической шероховатой поверхности сигнала.

## Законы частотной модуляции

В рамках проведенной работы рассмотрены: симметричная линейная частотная модуляция (ЛЧМ); несимметричная ЛЧМ; гармоническая частотная модуляция (рис. 3–5).

Как следует из представленных диаграмм, изменение во времени мгновенной частоты сигнала биений в приемнике радиовысотомера зависит от того, какую форму имеет модулирующий сигнал (закон частотной модуляции).

Симметричная пилообразная ЛЧМ (рис. 3) вызывает появление в сигнале биений зон обращения фазы, шириной равной времени задержки прохождения $\tau_H$, что приводит к возникновению ошибок измерения высоты.

Несимметричная пилообразная ЛЧМ (рис. 4) имеет зоны разрыва шириной $\tau_H$, где мгновенная частота биений претерпевает скачок, величина которого приблизительно равна девиации ЛЧМ. Эта частота находится далеко за пределами полосы пропускания тракта обработки сигнала биений, что вызывает замирание сигнала в зонах разрыва и порождает дополнительные погрешности в работе измерительной системы.

Гармонический закон частотной модуляции (рис. 5) представляется нболее интересным с точки зрения работы измерительного контура ФАПЧ, поскольку не вызывает появление зон обращения фазы и замираний сигнала биений. Нелинейный характер изменения мгновенной частоты биений не влияет на точность иерений, в силу особенностей работы радиовысотомера с измерительным контуром ФАПЧ.

## Оценка точности работы РВ

Представленные виды частотной модуляции были исследованы на математической модели сигнала, отраженного от цилиндрической шероховатой поверхности. В ходе математического моделирования определялась точность оценки высоты. Для эксперимента были заданы следующие сценарные условия: высота РВ $H = 75$ м; скорость движения носителя РВ $V = 0$ м/с; отношение сигнал/шум (ОСШ) $q^2 = 20$ дБ; радиус корреляции высот шероховатостей поверхности $L = 5$ м.

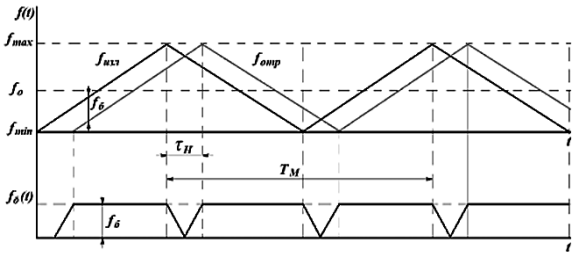



*Рис. 3. Симметричная пилообразная ЛЧМ*

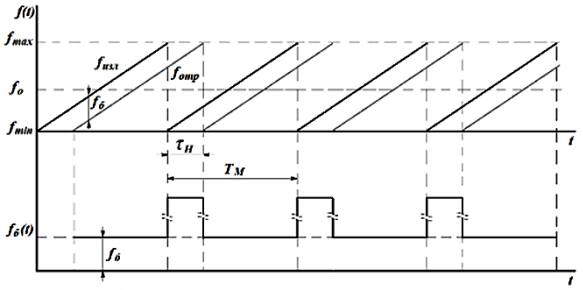



*Рис. 4. Несимметричная пилообразная ЛЧМ*

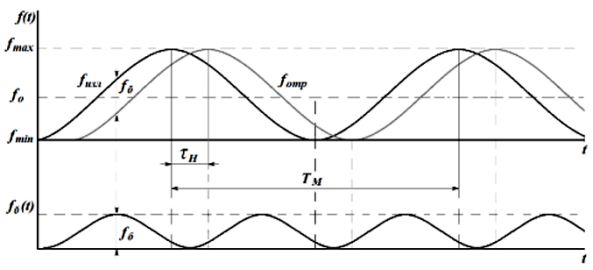
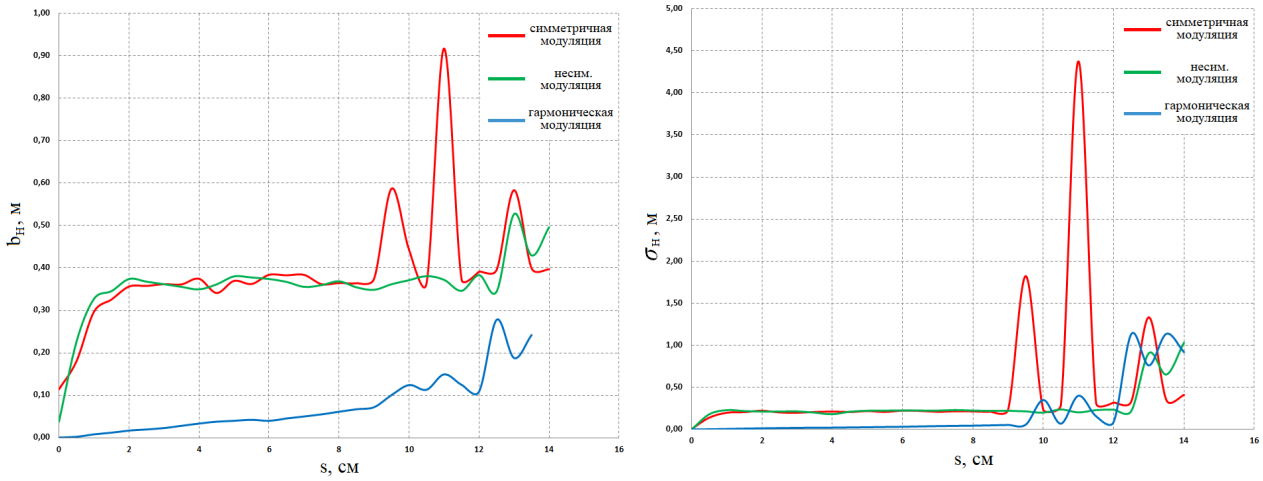



*Рис. 5. Гармоническая ЧМ*




а) б)

*Рис. 6. Зависимость: а – средней ошибки оценки; б – СКО от шероховатости поверхности*

Эксперимент организован таким образом, что для каждого вида частотной модуляции, при фиксированной величине ОСШ, сняты зависимости смещения оценки высоты $b_H$ и СКО оценки $\sigma_H$ в зависимости от СКО высот шероховатостей $s$, рис. 6*а*, *б*.

Всплески на графиках, которые появляются при больших значениях шероховатости, обусловлены глубоким замиранием полезного сигнала вследствие сложения противофазных откликов от большого количества отражающих точек. Однако при движении носителя РВ это явление носит кратковременный характер и может быть легко устранено при помощи фильтрации. Из представленных диаграмм следует, что наилучшие результаты показал гармонический закон ЧМ зондирующего сигнала. Причина этого очевидна: при данном законе у сигнала биений отсутствуют зоны обращения фазы и разрывы мгновенной частоты.

## Заключение

Проведенные исследования показали хорошую устойчивую работу измерительного контура ФАПЧ в радиовысотомере малых высот при использовании разных законов частотной модуляции. Наилучшие результаты по точности обнаружил гармонический закон частотной модуляции. Это связано с тем, что при таком способе модуляции в сигнале биений отсутствуют зоны обращения фазы или разрыва мгновенной частоты. Отсутствие этих зон обеспечивает более стабильную работу измерительного контура ФАПЧ и, как следствие, меньшие погрешности измерения высоты.

## Библиографический список

1. *Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И.* Теоретические основы радиовысотометрии / Под ред. А. П. Жуковского. М.: Сов. Радио, 1979. 320 с.

2. Пат. RU 207967 U1 G01S 13/34 (2021.08) H04L 25/03 (2021.08). Радиовысотомер с непрерывным излучением и фазовой автоподстройкой опорного сигнала / А. А. Монаков, А. А. Тарасенков.

3. *Roland E.* Best Phase-Locked Loops. Design, Simulation, and Applications. Fourth edition. USA. Ohio. Blacklick McGraw-Hill, 1999. 408 p.

4. *Shinnaka S.* A New Frequency-Adaptive Phase-Estimation Method Based on a New PLL Structure for Single-Phase Signals. 2007. P. 191–198, doi: 10.1109/PCCON.2007.372967.

5. *Monakov A., Nesterov M.* Statistical Properties of FMCW Radar Altimeter Signals Scattered |from a Rough Cylindrical Surface // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Feb. 2017. Vol. 53. N 1. P. 323–333.

6. *Федорюк М. В.* Метод перевала. М.: URSS, 2015. 368 с.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИСТИКА**

**УДК 656.025.4** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-43**

***В. А. Беляков****
*магистрант*
***А. В. Сумманен****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

*В представленной статье созданы рекомендации по выбору наиболее эффективного варианта по оптимизации маршрута организации доставки грузов в ООО «ТрансПрофи». Выполнен анализ расходов на доставку продукции потребителям собственным автомобильным транспортом ООО «ТрансПрофи» в 2020 году. Для снижения транспортных затрат филиала ООО «ТрансПрофи», модернизации системы грузоперевозок и увеличения эффективности применения подвижного состава компании предложено такое мероприятие как разработка оптимального маршрута движения транспортных средств. Выполнен расчет технико-эксплуатационных показателей маршрута. Создано предложение по увеличению загруженности автомобилей на данных направлениях путем ввода маятниковых маршрутов с груженым пробегом в двух направлениях.*
***Ключевые слова:*** *организация системы доставки грузов, автотранспортное предприятие, оптимизация маршрута.*

***V. A. Belyakov****
*Postgraduate Student*
***A. V. Summanen****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# DEVELOPMENT OF PROPOSALS TO IMPROVE THE SYSTEM OF DELIVERY OF SPARE PARTS AT A MOTOR TRANSPORT COMPANY

*In this article, recommendations have been developed for choosing the optimal option for optimizing the route of organizing the delivery of goods to TransProfi LLC. An analysis of the costs of delivering products to consumers by TransProfi LLC's own road transport in 2020 has been carried out. To reduce the transport costs of the branch of TransProfi, LLC, to improve the system of cargo transportation and to increase the efficiency of using the rolling stock, the company proposed such an event as the development of a rational route for the movement of vehicles. The calculation of the technical and operational indicators of the route has been carried out. A proposal has been developed to increase the congestion of vehicles in these directions by introducing pendulum routes with loaded mileage in both directions.*
***Keywords:*** *organization of cargo delivery system, motor transport company, route optimization.*

## Введение

На сегодняшний день процесс транспортировки грузов на предприятии считается составной частью бизнес-процессов и обхватывает почти все сферы деятельности. Организация системы доставки грузов является насущной для множества компаний, потому что стоимость товара содержит издержки на транспортную логистику. Как следствие, чем более правильно выстроена транспортная система, тем меньше расходов на этот процесс у предприятия. Систему доставки возможно охарактеризовать наличием двух или же нескольких коррелирующих элементов, выполняющих одну совместную основную задачу – поставку груза в точку назначения в необходимое время, в требуемом объеме по наименьшей стоимости [1].

## Мероприятия по оптимизации маршрута

Структура затрат на доставку продукции потребителям собственным автомобильным транспортом ООО «ТрансПрофи» в 2020 году:

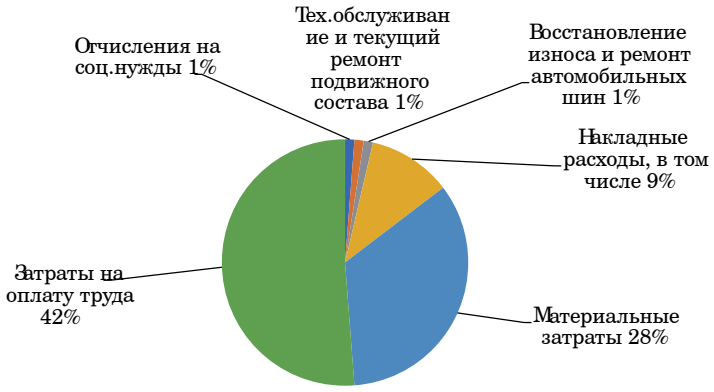



*Рис. 1. Структура затрат на доставку продукции потребителям собственным автомобильным транспортом ООО «ТрансПрофи» в 2020 году*

В ООО «ТрансПрофи» для улучшения системы перевозки грузов и более эффективной эксплуатации подвижного состава рекомендовано такое мероприятие как разработка более подходящих маршрутов движения автотранспорта. Организация перемещения автотранспорта компании на маршрутах должна быть такой, чтобы гарантировать большую производительность перевозок и содействовать понижению их себестоимости. Маршрутизация состоит в разработке таких маршрутов перемещения автотранспорта компании, которые обеспечивали бы наилучшее использование пробега машин [2].

Для уменьшения транспортных расходов филиала ООО «ТрансПрофи», улучшение системы перевозоки грузов и увеличения эффективности использования подвижного состава компании может быть предложено такое решение как разработка рационального маршрута движения транспортных средств. Формирование оптимальных маршрутов обеспечит компании увеличение коэффициента использования пробега, и соответственно, будет способствовать уменьшению себестоимости перевозок. Постепенное выполнение этого мероприятия может осуществиться уже в ближайшее время и не потребует привлечения вспомогательных финансовых средств. В настоящее время в филиале ООО «Транс Профи» не организована четкая работа по разработке рациональных маршрутов движения автотранспорта. Предлагается составление более рациональных маршрутов перевозок грузов за счет увязки грузопотоков для уменьшения порожних пробегов [3].

Одним из основных направлений междугородних перевозок ООО «ТрансПрофи» можно назвать Москва – Санкт-Петербург – Москва. Расчет технико-эксплуатационных показателей маршрута представлены в табл. 1.

В табл. 2 представлены годовые показатели себестоимости перевозки на маршруте Москва – Санкт-Петербург – Москва.

Рассматривая применение подвижного состава при перевозках грузов из Москвы в Санкт-Петербург, было выявлено, что загрузка грузового автомобиля ООО «ТрансПрофи» происходит только в Москве. Выходит, что 750 км пути автотранспорт совершает порожний пробег. При такой эксплуатации подвижного состава коэффициент использования пробега равен 0,5. По такому же принципу построена работа и на других маршрутах междугородних перевозок. Финансовые затраты, как известно, занимают большой удельный вес в структуре себестоимости продукции, как следствие, даже небольшое сбережение сырья, материалов, и энергии при производстве каждой единицы продукции в целом по предприятию дает ощутимый эффект.

Вследствие этого было создано предложение по увеличению загруженности автомобилей на данных направлениях посредством внедрения маятниковых маршрутов с груженым пробегом в обоих направлениях. Организация движения подвижного состава при перевозках должна гарантировать высокую производительность и наименьшую себестоимость перевозок. Для увеличения эффективности работы автомобильного транспорта заранее разрабатываются оптимальные маршруты движения. Эти маршруты можно разделить на маятниковые, кольцевые и комбинированные.

Увеличение эффективности использования автотранспорта на маятниковых маршрутах с обратным холостым пробегом достижимо посредством увеличения технической скорости автотранспорта, использование прицепов, максимальное использование грузоподъемности транспорта, уменьшение времени на погрузоч-

*Таблица 1*

**Технико-эксплуатационные показатели маршрута Москва – Санкт-Петербург – Москва**

| Показатель | Обозначение, ед. измерения | За оборот | За год |
|---|---|---|---|
| Длина нулевого пробега | $L_н$, км | 5 | 60 |
| Длина маршрута | $L_м$, км | 1420 | 1420 |
| Длина ездки с грузом | $L_{ег}$, км | 710 | 8520 |
| Длина ездки без груза | $L_х$, км | 710 | 8520 |
| Техническая скорость | $V_т$, км/ч | 70 | 70 |
| Грузоподъемность автомобиля | $q$, т | 11,5 | 11,5 |
| Коэффициент использования грузоподъемности | $\gamma_с$ | 1 | 1 |
| Суммарное время под погрузку и разгрузку | $t_{п-р}$, ч | 1,5 | 18 |
| Время движения | $t_д$, ч | 24 | 288 |
| Время отдыха водителей | $t_{отд}$, ч | 14 | 168 |
| Время на маршруте | $T_M = t_Д + t_{П-Р}$, ч | 25,5 | 306 |
| Время оборота | $t_o = t_Д + t_{ОТД}$, ч | 38 | 456 |
| Время в наряде | $T_H = t_o + \frac{L_H}{V_T}$, ч | 38,07 | 456,86 |
| Коэффициент использования пробега | $\beta = \frac{L_M}{L_H + L_x + L_M}$ | 0,5 | 0,5 |
| Производительность авто | $U = q \cdot \gamma_c$, т | 11,5 | 11,5 |
| Производительность авто | $W = U \cdot L_{ег}$, т/км | 8165 | 979980 |
| Производительность авто в час | $U_{РЧ} = \frac{q\gamma_c \beta V_T}{L_{ег}\beta V_T . t_{П-Р}}$, т | 0,27 | 0,27 |

*Таблица 2*

**Показатели себестоимости перевозки Москва – Санкт-Петербург – Москва**

| Показатель | Обозначение, ед. измерения | Значение |
|---|---|---|
| Время подгот.-закл. работ | $T_{ПЗ} = \frac{AT_H \cdot 0.38}{t_{см} - 0,38}$, ч | 14,91 |
| Повременная зарплата | $ЗП_{повр} = C_{час} \cdot (AT_H + T_{ПЗ})$, руб. | 70636,83 |
| Доплата за классность | $Д_{КД} = \frac{C_{час} \cdot 25 \cdot ФРВ}{100}$, руб | 17100 |
| Основной ФОТ | $ФОТ_{осн} = ЗП_{повр} + Д_К$, руб. | 87736,83 |
| Дополнительный ФОТ | $ФОТ_{ДОП} = \frac{\% \cdot ФОТ_{ОСН}}{100}$, руб. | 0 |
| Общий ФОТ | $ФОТ = ФОТ_{ОСН} + ФОТ_{ДОП}$, руб. | 87736,83 |
| Страховые взносы | $СВ = \frac{\% \cdot ФОТ}{100}$, руб. | 26496,52 |
| Затраты по статье з/п | $C_1 = ФОТ + СВ$, руб. | 114233,8 |
| Потребность топлива на пробег | $T_{ПР} = \frac{H_{100КМ} \cdot L_{общ}}{100}$, л | 5964 |

*Окончание табл. 2*

| Показатель | Обозначение, ед. измерения | Значение |
|---|---|---|
| Доп. потребность в топливе в зимнее время | $T_{ЗИМ} = \frac{0,1 \cdot T_{ПР} \cdot 0,42}{100}$, л | 2,5 |
| Общая потребность в топливе | $T_{общ} = T_{ПР} + T_{ЗИМ}$ л | 5966,5 |
| Затраты по статье топливо | $C_2 = Ц_Л \cdot T_{общ}$, л | 190928,2 |
| Затраты на моторное масло | $C_{ММ} = \frac{Ц_Л \cdot Н_{ММ} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$, руб. | 36336,01 |
| Затраты на масло трансмиссионное | $C_{МТР} = \frac{Ц_Л \cdot Н_{МТР} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$, руб. | 3579,903 |
| Затраты на спец. масла | $C_{МСП} = \frac{Ц_Л \cdot Н_{МСП} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$, руб. | 1252,966 |
| Затраты на пластичные смазки | $C_{СПЛ} = \frac{Ц_{КГ} \cdot Н_{СПЛ} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$, руб. | 2714,76 |
| Затраты на ГСМ | $C_3 = C_{ММ} + C_{МТР} + C_{МСП} + C_{СПЛ}$, руб. | 43883,64 |
| Затраты на восстановление износа шин | $C_4 = C_Ш \cdot n_Ш \cdot \frac{L_{ОБЩ}}{L_Ш}$, руб. | 12092,9 |
| Затраты на ТО и ТР | $C_5 = \frac{Н_{ТОТР} \cdot L_{ОБЩ}}{1000}$, руб. | 37658,4 |
| Затраты на амортизацию | $C_6 = \frac{Н_а \cdot C_а}{100}$, руб. | 264207,6 |
| Затраты на накладные расходы | $C_7 = \frac{\% \cdot ФОТ_{ОСН}}{100}$, руб. | 78976,57 |
| Общие годовые затраты на перевозку | $C_{ОБЩ} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7$, руб. | 741967,2 |

но-разгрузочные работы, а также в результате оптимальной маршрутизации.

При совершении грузовых перевозок ООО «ТрансПрофи» на направлении Москва – Санкт-Петербург – Москва применяется маятниковый маршрут с негруженым пробегом в первую дорогу. Подобный маршрут считается наименее целесообразным, потому что при работе на нем за один оборот совершается только 1 ездка. Маршрут Москва – Санкт-Петербург – Москва проходит через трассу М10 «Россия», общая длина которой насчитывает порядка 664 км.

Деятельность ООО «ТрансПрофи» можно улучшить, путем сокращения пробегов без груза, таким образом, преобразовав маршрут из обычного маятникового в маятниковый маршрут с полностью груженными пробегами в обоих направлениях. Важнейшей целью улучшения работы ООО «ТрансПрофи» на маршруте Москва – Санкт-Петербург – Москва будет являться увеличение коэффициента использования пробега с 0,5 до 1, за счет полного использования грузоподъемности подвижного состава.

В соответсвии с планом поставок на 2021 год, на маршруте Москва – Санкт-Петербург производятся регулярные перевозки заказов от ООО «СпецЭлектроПоставка». Склад данной организации находится по адресу: город Москва, Бережковская Набережная, дом 20, строение 6. Данные перевозки осуществляются один раз в месяц.

Исследовав предлагаемые загрузки на портале «АвтоТрансИнфо» по направлению Санкт-Петербург – Москва, был найден вариант перевозки на регулярной основе оборудования и запчастей для ООО «НПК «МЕГАДОР», склад которого находится по адресу Ленинградская область, поселок Шушары, Московское шоссе, дом 52. Стоимость перевозки, которая удовлет-

ворила и ООО «ТрансПрофи», и ООО «НПК «МЕГАДОР» составила 107 250 рублей за рейс. Местоположение склада является удобным для построения маршрута перевозки из-за того, что он находится на выезде из города по направлению в Москву. Адрес грузополучателя в Москве: Краснопресненская набережная, д. 14.

*Таблица 3*

**Технико-эксплуатационные показатели маршрута Санкт-Петербург – Москва – Санкт-Петербург**

| Показатель | Обозначение, ед. измерения | За оборот | За год |
|---|---|---|---|
| Длина нулевого пробега | $L_н$, км | 26 | 312 |
| Длина маршрута | $L_м$, км | 1420 | 1420 |
| Длина ездки с грузом | $L_{ег}$, км | 1420 | 17040 |
| Длина ездки без груза | $L_х$, км | 0 | 0 |
| Техническая скорость | $V_т$, км/ч | 70 | 70 |
| Грузоподъемность автомобиля | $q$, т | 11,5 | 11,5 |
| Коэффициент использования грузоподъемности | $\gamma_c$ | 1 | 1 |
| Суммарное время под погрузку и разгрузку | $t_{п-р}$, ч | 2,5 | 30 |
| Время движения | $t_д$, ч | 24 | 288 |
| Время отдыха водителей | $t_{отд}$, ч | 14 | 168 |
| Время на маршруте | $T_M = t_Д + t_{П-Р}$, ч | 26,50 | 318 |
| Время оборота | $t_o = t_Д + t_{ОТД}$, ч | 38 | 456 |
| Время в наряде | $T_H = t_o + \frac{L_H}{V_T}$, ч | 38,37 | 460,46 |
| Коэффициент использования пробега | $\beta = \frac{L_M}{L_H + L_x + L_M}$ | 1 | 1 |
| Производительность авто | $U = q \cdot \gamma_c$, т | 11,5 | 11,5 |
| Производительность авто | $W = U \cdot L_{ег}$, т/км | 16330 | 195960 |
| Производительность авто в час | $U_{РЧ} = \frac{q\gamma_c\beta V_T}{L_{ег}\beta V_T . t_{П-Р}}$, т | 0,5 | 0,5 |

Используя новые данные сделаны расчеты показателей работы подвижного состава на маршруте. Расчет технико-эксплуатационных показателей маршрута Москва – Санкт-Петербург – Москва после сокращения порожних пробегов представлен в табл. 3.

Также в табл. 4 показаны скорректированные статьи затрат ООО «ТрансПрофи» на перевозку.

*Таблица 4*

**Затраты на перевозку после внедрения маршрута**

| Показатель | Обозначение, ед. измерения | Значение |
|---|---|---|
| Потребность топлива на пробег | $T_{ПР} = \frac{H_{100КМ} \cdot L_{общ}}{100}$, л | 6816 |
| Дополнительная потребность в топливе в зимнее время | $T_{ЗИМ} = \frac{0,1 \cdot T_{ПР} \cdot 0,42}{100}$, л | 2,86 |
| Общая потребность в топливе | $T_{общ} = T_{ПР} + T_{ЗИМ}$, л | 6818,86 |
| Затраты по статье топливо | $C_2 = Ц_Л \cdot T_{общ}$, л | 218203,6 |
| Затраты на моторное масло | $C_{ММ} = \frac{Ц_Л \cdot H_{ММ} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$ руб. | 41526,87 |
| Затраты на масло трансмиссионное | $C_{МТР} = \frac{Ц_Л \cdot H_{МТР} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$ руб. | 4091,31 |
| Затраты на спец. масла | $C_{МСП} = \frac{Ц_Л \cdot H_{МСП} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$ руб. | 1431,96 |
| Затраты на пластичные смазки | $C_{СПЛ} = \frac{Ц_{КГ} \cdot H_{СПЛ} \cdot T_{ОБЩ}}{100}$ руб. | 3102,58 |
| Затраты на ГСМ | $C_3 = C_{ММ} + C_{МТР} + C_{МСП} + C_{СПЛ}$, руб. | 50152,74 |
| Затраты на восстановление износа шин | $C_4 = C_Ш \cdot n_Ш \cdot \frac{L_{ОБЩ}}{L_Ш}$, руб. | 12092,9 |
| Затраты на ТО и ТР | $C_5 = \frac{H_{ТОТР} \cdot L_{ОБЩ}}{1000}$, руб. | 37658,4 |
| Затраты на амортизацию | $C_6 = \frac{H_a \cdot C_a}{100}$, руб. | 264207,6 |

В результате становится понятным, что предложенная вариация рационализации маршрута для филиала ООО «ТрансПрофи» будет результативной и экономически прибыльна, сможет улучшить технико-эксплуатационные показатели работы подвижного состава компании, увеличить производительность автомобилей и уменьшить затраты на перевозки.

**Библиографический список**

1. *Демин В. А.* Оптимизация логистики крупных промышленных предприятий // Логистика. 2018. № 1. С. 40–46.

2. *Матюшин Л. С.* Современные проблемы логистики в транспортной сфере // Логистика. 2017. № 11. С. 88–94.

3. *Уотерс Д.* Логистика. Управление цепью поставок. М.: Юнити-Дана, 2018. 503 с.

**УДК 656.135.2** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-49**

***К. М. Бутомо****
*магистрант*
***С. В. Уголков****
*кандидат военных наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

*В статье рассматриваются проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами в России на современном этапе. Анализируются научные публикации последних двух лет по данной теме. Исследуются проблемы классификации отходов. Приводятся результаты сравнительных характеристик обращения с отходами в зарубежных странах и в России. Обозначены перспективные направления научных исследований в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами.*
***Ключевые слова:*** *твердые коммунальные отходы, классификация отходов, утилизация отходов, сортировка отходов, переработка отходов.*

***K. M. Butomo****
*Postgraduate Student*
***S. V. Ugolkov****
*PhD of Military Sc., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# DIRECTIONS FOR IMPROVING THE SOLID MUNICIPAL WASTE MANAGEMENT SYSTEM

*The article deals with the problems of solid municipal waste management in Russia at the present stage. The scientific publications of the last two years on this topic are analyzed. The problems of waste classification are investigated. The results of comparative characteristics of waste management in foreign countries and in Russia are presented. Promising areas of scientific research in the field of solid municipal waste management are outlined.*
***Keywords:*** *municipal solid waste, waste classification, waste utilization, waste sorting, recycling of wastes.*

## Введение

За последние без малого 25 лет руководство Российской Федерации (РФ), региональные власти и общественные организации обращают самое серьезное внимание на проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО). Как на федеральном, так и на региональном уровне были приняты новые законодательные акты, которые позволили специалистам уточнить терминологию, способствовали внедрению принципиально новых схем и алгоритмов в данной сфере.

В регионах созданы и функционируют территориальные схемы обращения с твердыми коммунальными отходами. Ведется работа, направленная на уточнение, корректировку, развитие этих схем.

В связи с вышеизложенным, чрезвычайно важным представляется изучение вопросов, имеющих отношение к классификации ТКО, так как выбор методов и способов обработки, обезвреживания, переработки, утилизации, захоронения находится в прямой зависимости от того, к какому виду принадлежат те или иные отходы. Не менее значимыми являются вопросы нормативов накопления ТКО, так как от точного понимания образующихся объемов отходов определяются периодичность вывоза, необходимые площади для размещения и производственные мощности для работы с ТКО.

Кроме того, большое значение имеет изучение мирового опыта обращения с ТКО и оценка возможностей использования этого опыта с учетом российской действительности.

## Научные исследования системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России

В научном сообществе в последние несколько лет общим мнением является следующее: не-

смотря на усилия, предпринимаемые для реформирования системы обращения с ТКО, состояние данной системы в России находится на низком уровне. Специалисты указывают, что принятые законы, проекты и программы содержат много недостатков, в числе которых недостаточная конкретизация ряда пунктов, отсутствие конкретных механизмов для осуществления планов и слишком оптимистичные прогнозы.

Так, в [1] практика обращения с ТКО охарактеризована как бессистемная, не учитывающая научно-технических достижений прошлого и настоящего. Авторы цитируют текст национального проекта «Экология», где декларируется строительство в РФ системы мусоросжигательных заводов (МСЗ) с заявленной мощностью около 37 млн т. в год. Для достижения этого плана понадобится построить 57 заводов. Такое количество МСЗ равняется количеству МСЗ, построенных в ФРГ за 50 лет. Очевидно, что такое количество заводов в России до 2024 года невозможно, учитывая неясные перспективы финансирования. Кроме того, есть мнение, что мусоросжигание – это менее экологичный способ обращения с ТКО, чем их разложение на полигонах (авторы работы подробно разъясняют способ биологического разложения на полигонах как процесс максимально приближенный к тем, что происходят в природных, естественных условиях). Теоретические и практические рекомендации, представленные в статье, представляют очевидную ценность, но они применимы для работы с уже имеющимися свалками и к методам утилизации непригодных к переработке ТКО.

## Анализ руководящих документов по классификации ТКО

Формирование эффективной схемы управления отходами зависит от их классификационных признаков. Адекватная классификация определяет так называемую дорожную карту для ТКО: рациональную схему движения отходов с учетом возможных изменений и развития. Однако данный подход до сих пор не получил должного распространения, на сегодня классификация ТКО служит в основном для расчета экологических платежей, которые определяются классом опасности ТКО.

Приказом Росприроднадзора № 242 определен код для ТКО: 7 30 000 00 00 0. Полный перечень ТКО содержится в тексте последней редакции ФККО [2]. В этом документе можно найти ряд противоречий. Так, правомочность отнесения к ТКО отходов типа уличного смета, травы и т. п. находится под вопросом, так как противоречит Закону 89-ФЗ [3], где прямо указано, что ТКО – это отходы, образующиеся только в помещениях.

Кроме того, отдельные компоненты ТКО отнесены к другим разделам ФККО, например, к 4 разделу «Отходы потребления производственные и непроизводственные…» – «изделия из натуральных, синтетических, искусственных и шерстяных волокон, утратившие потребительские свойства», незагрязненные, «отходы продукции из термопластов незагрязненные» и др., а также «лампы ртутные, ртутно-кварцевые, люминесцентные, утратившие потребительские свойства» (1 класс опасности) Перечисленные отходы тоже могут образовываться в помещениях, в том числе жилых и офисных. Но они помещены в 4 раздел ФККО как «отходы оборудования и прочей продукции, подлежащей особому контролю». Однако большинство видов ТКО – это отходы 4–5 классов опасности [4].

## Фракционный и морфологический состав ТКО

Состав ТКО может разниться в зависимости от экономических особенностей региона, от преобладающего типа домов (многоквартирные или частные) в населенном пункте, по характеру потребления, доходам населения и т. д. Состав отходов, чаще всего образующихся в населенных пунктах РФ, представлен на рис. 1.

Основные свойства ТКО зависят от их фракционного и компонентного (морфологического) состава.

Фракционным составом ТКО является содержание (в %) массы компонентов, проходящих через сита с различными ячейками. При этом самая большая доля (47,4 %) – это фракция отходов размером до 150 мм и отсев (32,3 %) размером до 50 мм. Фракция отходов более 250 мм содержится в 7 % отходов.

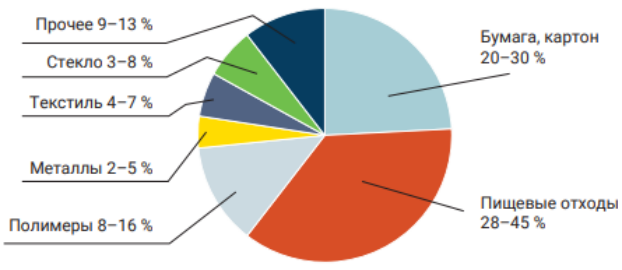



*Рис. 1. Усредненный состав ТКО в населенных пунктах РФ*

Компонентный (морфологический) состав ТКО – это содержание в отходах отдельных компонентов, отличающихся по происхождению, химическому составу и свойствам. По данным показателям можно судить о ресурсном потенциале и возможностях дальнейшего обращения с ТКО.

Морфологический состав и влажность компонентов ТКО позволяет оценить будущие показатели получаемого сырья, например, компоста после применения биотехнологических методов для ТКО с высоким содержанием растительных, пищевых и животных отходов, когда извлечение вторичных ресурсов или энергетическая утилизация нецелесообразны.

## Зарубежный опыт переработки утилизации ТКО

Среди главных проблем, не позволяющих эффективно организовать переработку и/или утилизацию ТКО, – отсутствие их сортировки и повышенная влажность. Например, выбор термического способа (сжигание) зависит от содержания в отходах органического вещества, а также их элементный состав, влажность и зольность – это определяет количество образующегося тепла, золы, шлака, загрязняющих веществ.

Многие научные исследования были посвящены сравнительному анализу обращения с ТКО в России и за рубежом. Из последних работ по данному вопросу можно назвать статью С. В. Шилкиной «Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России» [5], где приведена статистика по проблемам обращения с отходами в Европе, США и Японии. Автор приходит к выводу, что на сегодня в мире применяются два альтернативных подхода к ТКО: сжигание и переработка. В странах западной Европы преимущественно применяется переработка отходов, а в Японии предпочтительным способом является сжигание с применением передовых технологий, которые практически нивелируют риск загрязнения окружающей среды. Проведенный С. В. Шилкиной анализ содержит хорошо систематизированные фактические сведения о состоянии сферы обращения с ТКО в масштабах планеты, но вопрос выбора приоритетных способов для российской действительности остается открытым.

В Германии за счет переработки ТКО до 80 % отходов используется для получения новых продуктов или электроэнергии на МСЗ. В Японии явное предпочтение отдают способу сжигания: таким образом, утилизируется 70 % отходов. В стране построено 1900 МСЗ (это самое большое количество среди всех стран мира).

Успешная переработка и утилизация ТКО в зарубежных странах обеспечивается организацией сортировки мусора. Население складирует образовавшиеся отходы в установленные контейнеры для разных видов ТКО (рис. 2).

*Рис. 2. Контейнеры для раздельного сбора ТКО в Японии*

## Современное состояние обращения с ТКО в Российской Федерации

В отличие от развитых европейских и азиатских стран, в РФ сохраняется крайне невысокий уровень развития обращения с ТКО: почти полное отсутствие сортировки и раздельного сбора, слабое состояние инфраструктуры и недостаток производственных предприятий для переработки и/или утилизации отходов. Несмотря на принятые за последние годы решения и действия по реформированию системы, свалки и захоронение на полигонах остаются основными способами обращения с ТКО.

В РФ на настоящий момент насчитывают более 4 млн гектаров земельных участков выделено под размещение отходов, ежегодно под эти цели выделяется еще по 400 тыс. га. При этом действуют также нелегальные свалки, количество которых трудно оценить: называются цифры от десяти до сотен тысяч.

По статистическим данным Росприроднадзора [6], в нашей стране 3921 действующий объект обращения с ТКО. Из них на объекты переработки приходится 295, на объекты утилизации – 119, обезвреживания – 194, на специально оборудованные полигоны – 1038. Оставшиеся 2275 объектов представляют собой свалки, часто не оборудованные никакими средствами защиты от загрязнения водной среды, недр и прилегающих территорий представлено распределение 3921 объекта обращения с ТКО в РФ по федеральным округам (рис. 3).

Таким образом, очевидно, что система управления ТКО в РФ требует дальнейших преобразований. Мощности существующих полигонов и свалок практически исчерпаны, постоянно приходится выделять под такие объекты новые участки. С ростом объемов отходов увеличивается нагрузка на и так слабую инфраструктуру для цивилизованного обращения с ТКО, а развитие этой инфраструктуры идет очень медленными темпами. Понятно, что количество полигонов в ближайшее время будет расти и дальше.

Вместе с тем ясно, что полигоны не могут стать решением обозначенных проблем: они необходимы лишь для захоронения самого минимального количества ТКО, которое невозможно утилизировать или переработать. Сегодня на полигоны отправляют 90 % ТКО, перерабатывается, соответственно, от 5 до 10 %. Ни у кого не вызывает сомнений необходимость внедрять в сферу обращения с отходами современные технологии, изучать и применять опыт зарубежных стран [4].

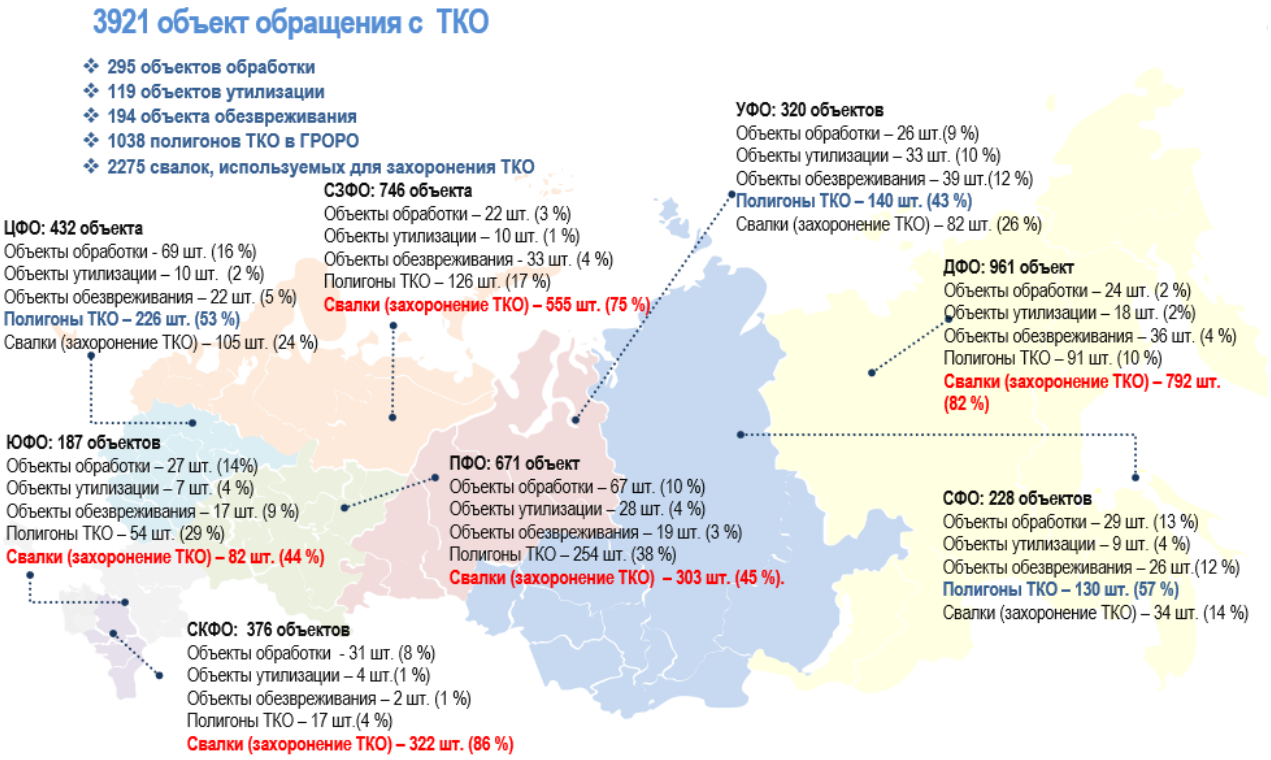



*Рис. 3. Объекты обращения с ТКО в РФ*

## Направления совершенствования системы управления ТКО в России

В последнее время в РФ предприняты достаточно серьезные меры для улучшения сложившейся ситуации. В регионах созданы и работают территориальные схемы обращения с отходами. Российский экологический оператор (РЭО), созданный в 2019 году, призван анализировать и корректировать территориальные схемы, создающиеся в регионах, однако пока эти схемы не совершенны.

В планах предусмотрено строительство в различных регионах России МСЗ, технопарков, сортировочных комплексов.

Из 27 000 обнаруженных несанкционированных свалок за последние 2 года ликвидировано 18 000. Для предотвращения их дальнейшего появления закон обязывает оборудовать все транспортные средства-мусоровозы системой ГЛОНАСС или ее аналогом.

Кроме того, законодателем закреплена так называемая «расширенная ответственность производителя» (РОП), которая призвана стимулировать производство товаров в экологичной упаковке или требует оплачивать утилизацию ее отходов. На сегодня это нововведение работает не в полной мере: многие производители не знают о РОП, дающая преференции за снижение количества ТКО или утилизацию отходов за свой счет [4].

Необходима работа как с населением, так и с бизнесом для формирования принципиально новой концепции обращения с отходами. Должно прийти понимание, что сокращение количества отходов выгодно и материально, и в плане улучшения экологии, и повышает качество жизни людей. Согласно многочисленным опросам люди одобряют раздельный сбор ТКО, население понимает важность и нужность таких процессов. В населенных пунктах различных регионов создаются инициативные объединения, группы в социальных сетях, создается общественная инфраструктура по раздельному сбору, появляется все больше компаний, которые готовы перерабатывать ТКО.

При организации раздельного сбора ТКО следует тщательно планировать логистические процессы, так как небольшое количество мусороперерабатывающих предприятий приведет к увеличению затрат на вывоз ТКО до мест их переработки или утилизации.

Сегодня в системе обращения с ТКО при почти полном отсутствии раздельного сбора и сортировки особое значение имеет строительство при уже функционирующих полигонах сортировочных и перерабатывающих предприятий (комплексов). Отсортированные ТКО возможно использовать в производстве вторичного сырья, а оставшуюся часть обезвреживать и захоранивать. Для повышения заинтересованности РО в деятельности по сокращению объема отходов, которые обычно захораниваются, развитии качества обезвреживания отходов, снижении токсического воздействия полигонов на окружающую среду целесообразно исключить плату за размещение отходов сверх нормы и включить в методику расчетов единого тарифа траты на санацию и рекультивацию земельных участков. Также необходимо пересмотреть существующие нормативы по размещению ТКО, поскольку они, по мнению специалистов, слишком малы, что не соответствует реальному негативному влиянию на окружающую среду [7].

Таким образом, отказаться от полигонов в настоящее время не представляется возможным (не подготовлена инфраструктура для качественного раздельного сбора, производственные мощности сортировки, а, следовательно, и для продуктивной переработки и утилизации ТКО). По нашему мнению, на данный момент актуальным будет решение не отказываться от полигонов, а широко использовать их возможности для продвижения современных способов переработки и утилизации ТКО.

## Заключение

Библиометрический анализ на основе систем «Scopus» и Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) показывает, что научное сообщество уделяет проблемам обращения с ТКО пристальное внимание. Но конкретные решения выявляемых проблем пока находятся в стадии разработки. Например, построение математических моделей для создания эффективных схем обращения с ТКО в последние два года практически не используется. В связи с этим одним из перспективных направлений научных исследований, на наш взгляд, является имитационное моделирование процессов обращения с ТКО с учетом использования различных способов их обработки.

### Библиографический список

1. *Осипов В. И., Хмельченко Е. Г.* Анализ системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России: проблемы и перспективы создания безопасной технологии утилизации отходов // Муниципальная академия. 2021. № 3. С. 61 – 67.

2. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. 22 мая 2017 года № 242 «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов». URL: http:// docs.cntd.ru/ document/542600531 (дата обращения: 18.10.2021).

3. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 14 июня 2020 г.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_ doc_LAW_19109 (дата обращения: 01.11.2021).

4. *Бутомо К. М., Уголков С. В.* Современное состояние проблемы обращения с твердыми коммунальными отходами. Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Вторая Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2021 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2021. С. 76–80.

5. *Шилкина С. В.* Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России // Отходы и ресурсы. 2020. № 1. URL: https://resources.today/ PDF/05ECOR120.pdf (дата обращения: 06.11.2021).

6. Росприроднадзор: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: https://spb. rpn.gov.ru (дата обращения: 10.11.2021).

7. *Тагаева Т. О., Казанцева Л. К., Коржубаева А. А.* Система управления отходами производства и потребления в России // Экологический вестник России. 2019. № 6. С. 25–30.

**УДК 656.025.2** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-55**

***Д. Д. Варкентин****
*магистрант*
***С. В. Уголков****
*кандидат военных наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

*В данной статье рассматривается тенденция на обновление и техническое совершенствования пассажирского транспорта Санкт-Петербурга. В работе производится анализ технического состояния пассажирского городского транспорта, пути его совершенствования, а также проведено сравнение нового и старого городского общественного транспорта по основным важным показателям.*
***Ключевые слова:*** *модернизация транспорта, электробус, сравнительные характеристики транспорта, реформа общественного транспорта, технико-экономические показатели, развитие экологического транспорта, закупки новой техники, тестирование автобусов на СПГ.*

***D. D. Varkentin****
*Postgraduate Student*
***S. V. Ugolkov****
*PhD of Military Sc., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# MODERNIZATION OF PUBLIC TRANSPORT IN ST. PETERSBURG

*This article discusses the trend towards the renewal and technical improvement of passenger transport in St. Petersburg. The paper analyzes the technical condition of passenger urban transport, ways to improve it, and also compares new and old urban public transport according to the main important indicators.*
***Keywords:*** *modernization of transport, electric bus, comparative characteristics of transport, reform of public transport, technical and economic indicators, development of ecological transport, procurement of new equipment, testing of buses on LNG.*

## Введение

Еще несколько лет назад в Санкт-Петербурге по маршрутам ходил старый транспорт, произведенный еще в прошлом веке, сейчас ситуация постепенно меняется ежегодно закупаются множество новых подвижных составов пассажирского транспорта.

Рынок диктует жесткие условия, при которых использование транспорта прошлого века становится не целесообразно. Возрастания стоимости топлива, потребности в перевозках, борьба с загрязнением воздуха. Все это подвигает транспортные компании регулярно обновлять свой подвижной состав.

Главными целями нового транспорта являются:

– экологичность;
– экономичность;
– надежность;
– долговечность;
– компактность;
– большая вместимость;
– низкая потребляемость топлива;
– возможность проведения досуга пассажиров.

Все эти цели довольно сложно совместимы. Многие из них являются противоречивыми по отношению к другу другу, поэтому конструирование и выбор подвижного состава для общественного пассажирского транспорта является сложной задачей.

Старый транспорт не обладает теми качествами, которые в условиях нынешнего города становится необходимыми. Он проигрывает новому по всем важным показателям, в условиях технического прогресса недопустима стагнация общественного транспорта и транспортной сети в целом.

## Анализ текущей транспортной ситуации

В целом городским наземным транспортом в Санкт-Петербурге заведуют две компании это «СПб ГУП Пассажиравтотранс», которая отвечает за автобусы в городе и «СПб ГУП Горэлектротранс», которая занимается трамваями и троллейбусами на всех маршрутах.

В последнее время закупки нового пассажирского транспорта производятся довольно часто. К примеру, недавно все автобусы в Санкт-Петербурге стали низкопольные, постоянно автобусный парк пополняется новыми современными машинами. Несмотря на увеличение количества новых современных троллейбусов, в городе эксплуатируется еще довольно много старых вагонов. Ситуация с трамваями еще хуже, на многих маршрутах курсируют трамваи еще советского периода. Кроме того, что старый транспорт уступает по многим технико-эксплуатационным показателям, вероятность того, что старый парк машин выйдет из строя по причине технической неисправности значительно выше. Это становится основной причиной ухудшения транспортной ситуации, которая и так довольно сложная.

В случае поломки одного трамвая в рейсе дальнейшее движения всех остальных трамваев на данном маршруте становится невозможным. Такая ситуация уже несколько складывалась в городе.

Например, за прошедший месяц было зарегистрировано несколько случаев, когда трамвай встал на перекрестке и полностью перекрыл на нем движение. Это произошло в дневное время и машины начали разворачиваться через двойную сплошную.

Как видно из данного примера, сломавшийся трамвай помешал не только движению трамваев, но и перекрыл автомобильную дорогу став причиной возникновения очередного затора на дороге и спровоцировал водителей на нарушения ПДД. В целом аварии на дорогах являются частым явлением для города, наибольший ущерб они наносят движению городского общественного транспорта, так как водители автобусов не могут сменить маршрут.

## Перспективные направления в области общественного транспорта

Несмотря на стремительное обновление (по сравнению с тем, что было 5–10 лет назад), сейчас парк новых машин внедряется, постепенно разбавляя и заменяя старые модели общественного транспорта. Однако в ближайшем будущем планируются кардинальные изменения во всех автобусных и троллейбусных парках города. Данные изменения будут санкционированы реформой пассажирского общественного транспорта 2022 года, основными целями которой являются:

– обновление парка пассажирского городского транспорта;

– совершенствование технических характеристик подвижного состава;

– повышение экологических показателей;

– обеспечение комфорта пассажиров.

По завершении данной реформы в Санкт-Петербурге должно появиться более 100 новых маршрутов, также планируется существенно обновить парк автобусов в Санкт-Петербурге – появиться 2800 новых автобусов. Также по окончанию реформы новые троллейбусы с возможностью автономного хода должны заменить устаревшие высоко рамные вагоны, которые к данному времени эксплуатируется на дорогах уже более 10 лет.

Большинство популярных коммерческих маршрутов в ходе реформы заменят новые социальные городские маршруты. К окончанию реформы городской транспорт должен остаться почти безальтернативным [1].

## Перспективные направления автобусного парка

Множество автобусов, которые были закуплены в 2020–2021 году, уже курсируют по маршрутам города. В них размещены новые системы валидаторов, которые читают все виды карт и возможно пополнить проездной. Новые автобусы оснащены хорошей отопительной системой и системой кондиционирования. В салонах новых автобусов присутствует зарядки для телефонов, а также действует бесплатный wi-fi. Также в новых автобусах увеличилось число мест для сидения, появились складные сидения. Машины могут вмещать до 170 пассажиров.

В современных автобусов применяются самые новые технологии в плане технического оснащения, это позволяет сделать салон более компактным.

Например, автобусы новой модели МАЗ–216, которые были закуплены «СПб ГУП Пассажиравтотранс» в количестве 100 шт. имеют двигатель, построенный не по тянущей схеме (двигатель в первой секции), а по более сложной толкающей, с мотором в корме, что позволяет избавиться от громоздкой моторной шахты посреди салона [2] (рис. 1).

**МАЗ-216**

| | |
|---|---|
| **Завод-изготовитель** | МАЗ |
| **Выпускался, гг** | 2018 — наст. время |
| **Экземпляры** | не менее 147 |
| **Макс. скорость, км/ч** | 100 |
| **Класс автобуса** | особо большой |
| **ЭКО стандарт** | Евро-5 |
| **Вместимость** | |
| **Мест для сидения** | 40 |
| **Номинальная вместимость (5 чел./** | 165 |

*Рис. 1. «МАЗ-216»*

Первым автобусом на природном газе, который вышел на дороги в Петербурге стал МАЗ-203. Он тестировался в Пушкинском районе, так как там есть специальная заправка, которая позволяет заправлять автобусы метаном.

Позже город закупил еще два автобуса Нефаз-5299 и Лиаз-5292.67, который является первым автобусом российской сборки, ориентированный на сжиженный природный газ.

Главная проблема заключается в том, что город, имеет одну заправочную станцию, которой уже сейчас пользуются еще и около 300 единиц грузовой техники. Это вызывает сложность распланировать график оборота транспортных средств и рабочее время водителей. Сейчас пока автобусов всего 3, они обслуживаются вне очереди, но эта мера временная и явно не будет действовать, если машин будет больше десятка. И тогда перед перевозчиком встанет выбор: вкладываться в собственную заправочную инфраструктуру или отложить данную разработку [3].

## Перспективные направления электротранспорта

В Санкт-Петербурге закупаются троллейбусы с возможностью автономного хода. К примеру, в Москве закупаются электробусы. Это связанно с тем, что в столице больше бюджет, а вся инфраструктура, которой сейчас нет, обойдется городу довольно дорого, к тому же у электробусов есть много недостатков. Несмотря на то, что они являются экологичным транспортом, для их применения необходимо вырабатывать много энергии, а это требует большого количество электростанций, которые плохо влияют на окружающую среду.

Электробусы к тому же не могут обеспечить большую проходимость, а в условиях города необходимо преодолевать немалые расстояния, еще к этомунеобходимо добавить, что электробусы стоят довольно дорого по сравнению с автобусами и троллейбусами.

В заключение можно сравнить: новый автобус МАЗ-216, электробус KAMAZ и новый троллейбус АКСМ-43303 «Vitovt Max II». Их технические характеристики представлены на рис. 1–3.

Троллейбус модели 43303 «Vitovt Max II» – трехосный, низкопольный вагон, оборудованный механической аппарелью, электронной системой управления на IGBT-модулях, тяговым электродвигателем переменного тока фирмы Škoda мощностью 210 кВт и дизель-генераторной установкой фирмы Kirsch, в основе которой лежит дизельный двигатель Iveco APU 100 DIPME мощностью 150 л. с. Использование дизель-генератора дает возможность двигаться вне зависимости от наличия тока в контактной сети, то есть работать на любом маршруте, в том числе в режиме автобуса. Стоимость троллейбуса составляет около 30 млн рублей. Данный троллейбус представлен на рис. 2 [4].

На рис. 3 представлен КамАЗ-6282. Данный электробус имеет запас хода до 100 км и стоит около 40 млн руб.

Из всех вариантов самым дешевым оказывается автобус МАЗ-216 [5], который стоит около 15 млн руб. При этом он также самый вместительный.

Троллейбус нового поколения с возможностью автономного хода стоит 30 млн руб., его пассажиро вместимость также соотносима с автобусом.

Наиболее дорогой оказался электробус при этом его вместимость гораздо меньше, чем в остальных вариантах.

| | |
|---|---|
| Максимальная конструктивная скорость, км/ч | 60 |
| Пассажировместимость, чел | 153 |
| Мест для сидения | 38 |
| Масса снаряженного троллейбуса, кг | 17500 |
| Время разгона троллейбуса с максимальной технической массой до скорости 50 км/ч, с, не более | 15 |
| Колея передних / задних колёс | 2096 / 1898 |
| Схема компоновки транспортного средства | Вагонная, расположение тягового двигателя за задней осью |
| Тип кузова / количество дверей | Сварной, несущий / четыре двустворчатые |
| База, мм | 8085 |

*Рис. 2. «Vitovt Max II»*

*Рис. 3. Технические характеристики КамАЗ-6282*

## Заключение

Сейчас в Санкт-Петербурге используется очень мало электробусов и автобусов на СПГ. Основной причиной этого является то, что в городе нет необходимой инфраструктуры для этого транспорта. Последнее время город тратит много денег на покупку новых троллейбусов и автобусов, работающих на дизельном топливе.

В данный момент альтернативные виды транспорта не могут использоваться в полной мере. Они внедряются лишь в отдельные районы города, где есть относительно развитая инфраструктура. Поэтому массовое внедрение электробусов и автобусов на СПГ будет довольно проблематично. Закупки новой техники можно отметить как положительный фактор.

В Санкт-Петербурге есть большая троллейбусная сеть, которая может применяться и для троллейбусов с автономным ходом. К тому же новые троллейбусы могут преодолевать большие расстояния и без контактной сети, что позволяет также увеличивать маршруты этого вида транспорта и покрывать новые районы города, у которых отсутствует в достаточной степени инфраструктура для движения электротранспорта.

### Библиографический список

1. Реформа пассажирского транспорта Санкт-Петербурга. URL: https://www.gov.spb.ru (дата обращения: 05.12.2021).

2. Сводка по закупаемому транспорту в СПб. URL: https://autoreview.ru (дата обращения: 13.12.2021).

3. Внедрение автобусов на СПГ в СПб. URL: https://zen.yandex.ru (дата обращения: 12.12.2021).

4. Перечень электротранспорта в СПб. URL: https://electrotrans.spb.ru (дата обращения: 14.12.2021).

5. Перечень автобусов в автобусных парках СПб. URL: https://fotobus.msk.ru (дата обращения: 14.12.2021).

**УДК 681.5** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-59**

***А. А. Добровольская****
*ассистент*
***В. А. Фетисов****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА МИКРОУРОВНЕ ТРАНСПОРТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

*В статье рассматривается задача внедрения цифровых моделей в процесс транспортного планирования городских транспортных систем. Исследованы пути использования беспилотных авиационных систем для получения динамических данных о состоянии инфраструктуры. Рассматриваются этапы создания цифровых моделей транспортных систем, оценена эффективность их применения в городской среде на основании модели полученной в лабораторных условиях.*
***Ключевые слова:*** *беспилотный летательный аппарат, цифровая модель поверхности, транспортная инфраструктура, городская среда.*

***A. A. Dobrovolskaia****
*Assistant*
***V. A. Phetisov****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# APPLICATION OF DIGITAL MODELS OF TRANSPORTATION SYSTEMS AT THE MICRO LEVEL OF TRANSPORT PLANNING

*The article deals with the problem of introducing digital models into the process of urban urban urban systems. The ways of using unmanned aerial systems to obtain dynamic data on the state of the infrastructure are investigated. The stages of creating digital models of the transport system are considered, the effectiveness of their application in an urban environment is estimated on the basis of a model in laboratory conditions.*
***Keywords:*** *unmanned aerial vehicle, digital surface model, transport infrastructure, urban environment.*

Сегодня практически невозможно представить организацию или процесс в которых не происходит автоматизация за счет внедрения цифровых сервисов. Цифровые модели являются значимым элементом в составлении географических информационных систем, систем навигации, систем ведения кадастров и множества других. При принятии решений о модернизации объектов транспортной инфраструктуры, возникает проблема отсутствия актуальной информации о их состоянии, поскольку многие данные существуют в виде чертежей, созданных на этапе ввода в эксплуатацию. Эти данные визуализируются для использования в виде двухмерных данных – совокупности технического описания объекта, однако, сегодня этого недостаточно. Кроме того, необходима разработка качественных цифровых моделей как для исследования процессов транспортной системы, так и для возможности выполнения моделирования процессов и систем. В данном аспекте цифровая модель должна иметь возможность быть интегрированной с имитационными программными системами. На данный момент есть ограниченное количество таких успешных решений, как к примеру, приведено в работах [1]–[3].

В городской среде возникает необходимость эффективного управления, что требует перехода к трехмерным изменяемым данным – созданию цифровых двойников транспортных узлов и цифровых моделей [4], [5]. Использование цифровых моделей транспортных систем для моделирования может стать главным методом модернизации системы управления транспортом в городах. Цифровая модель может отражать в себе полную и актуальную информацию об объекте и 3D-модель, которую можно использовать внутри цифровой среды для проработки искомого решения по модернизации транспорт-

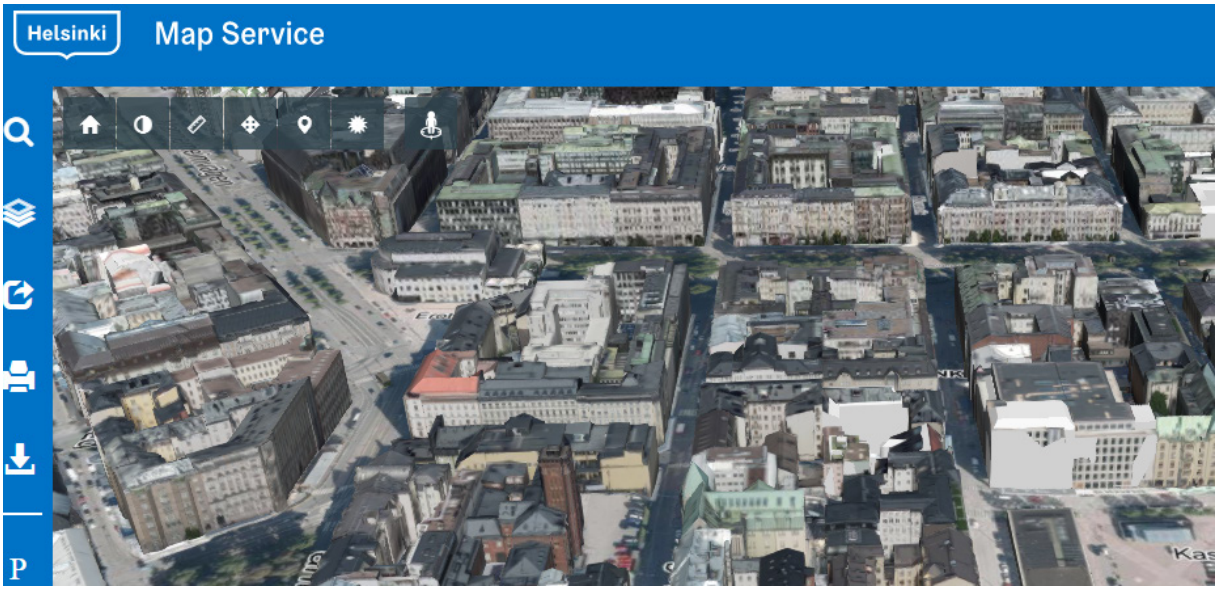



*Рис. 1. Трехмерная модель Хельсинки*

ной среды на разных уровнях транспортного планирования.

Положительным примером использования подобных моделей городских пространств можно назвать город Хельсинки (рис. 1). В России первый опыт создания трехмерной модели городского пространства с использованием беспилотного летательного аппарата был продемонстрирован компанией «Геоскан» в Томске: в результате аэрофотосъемки на площади более 320 км$^2$ создана цифровая модель местности, ортофотоплан, трехмерная модель местности и фотопанорамные снимки города [8]. Опыт такого рода четко демонстрирует преимущества использования беспилотных летательных аппаратов для получения цифровых моделей городских пространств.

Применение беспилотных летательных аппаратов для создания трехмерных моделей позволяет дорожным службам использовать актуальные данные о состоянии объектов транспортной инфраструктуры и принимать оперативные меры по их восстановлению. Кроме того, за счет исключения человеческого фактора производительность обработки данных увеличивается. Рассмотрим возможность применения цифровых моделей на микроуровне транспортного планирования, а именно уровне перекрестков автомобильных дорог (рис. 2).

Цифровая модель содержит в себе данные высотных характеристик и плановых координат местности высокой точности, с помощью которых можно проводить анализ местности, рельефа или интересующих инфраструктурных

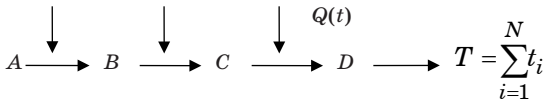



*Рис. 2. Этапы проектирования автомобильных дорог:*
*A – постановка задания на проектирование;*
*B – сбор необходимой исходной информации;*
*C – создание проекта и выпуск документации;*
*D – согласование в компетентных органах готового проекта; Q (t) – влияние случайных факторов изменяющихся во времени;*
*$t_i$ – время затраченное на этапе*

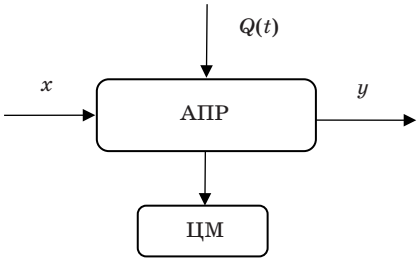



*Рис. 3. Внедрение цифровых моделей при принятии решений: x – исходные данные; АПР – алгоритм принятия решений; ЦМ – цифровая модель; y – выходные данные: готовый к реализации проект*

объектов [6]. Таким образом, цифровые модели могут быть внедрены даже на микроуровне транспортного планирования (рис. 3).

Виды цифровых моделей местности:

– рельефа местности: состоит из набора точек с известными координатами и высотами;

– контуров местности: состоит из данных о характеристиках и положении объектов на местности.

Существующие методы создания цифровых моделей [7]:

– фотограмметрическая обработка материалов аэросъемки и космической съемки;

– обработка материалов наземной съемки;

– оцифровка картографических материалов.

## Алгоритм получения данных и построения цифровой модели в информационной среде с применением беспилотного летательного аппарата

**1. Определение области миссии.**

Необходимо определить количество линий для облета, которые полностью покроют область миссии [9], поскольку беспилотные летательные аппараты работают от аккумуляторов, а исследуемая область может быть разделена на отдельные зоны облета.

Варианты маршрутов облета (рис. 4):

– замкнутый кольцевой маршрут (1);

– челночная схема полета (2);

– облет линейного объекта (3).

**2. Установка опорных точек на области миссии.**

Беспилотные летательные аппараты обустроены приборами GPS, которые записывают географическое состояние видеокамеры во всех позициях осуществления съемки. Данная информация необходима для применения выравнивания и привязки изображений к единому изображению. В большинстве случаев GPS-устройства, не обладают высокой точностью, что может повлиять на качество итоговой аэрофотосъемки.

Одна из методик увеличить геометрическую точность получаемых изображений – ввести заранее известные координаты наземных опорных точек. Опорные точки сооружаются на области миссии перед полетом. Географические координаты опорных точек определяются заранее с высокой точностью в зависимости от пространственного разрешения предполагаемых изображений.

Система координат в Metashape [10] может быть задана по координатам камер или по координатам опорных точек. При использовании координат опорных точек для задания системы координат, необходимо указать проекции опорных точек на соответствующих изображениях, то есть расставить маркеры на снимках (рис. 5).

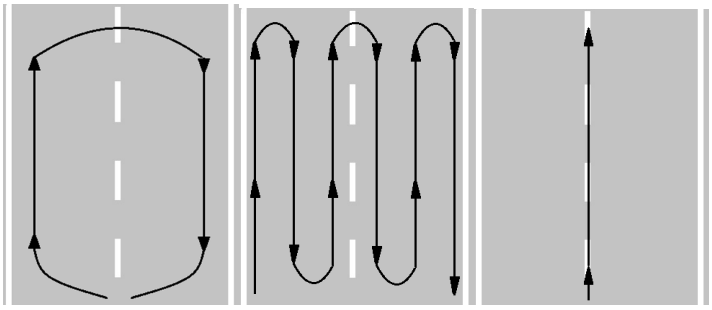


*Рис. 4. Маршруты облета*

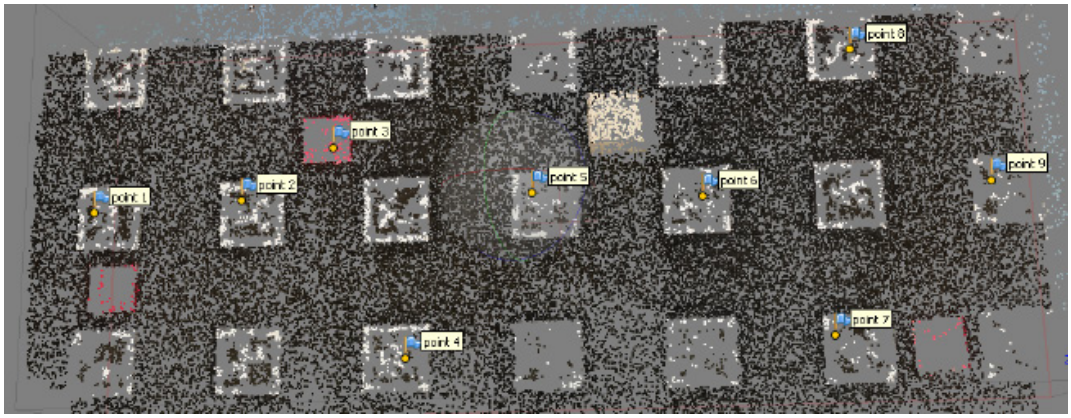



*Рис. 5. Расстановка маркеров*

**3. Разработка полетной миссии.**

Необходимо определить параметры для разработки плана полета, поскольку эти параметры влияют на конечные изображения объекта.

*Высота полета*

Высота полета зависит от пространственного разрешения изображений и фокусного расстояния используемой камеры: чем выше высота полета, тем меньше пространственное разрешение изображений. При необходимости сбора подробной информации о состоянии дорожного покрытия, необходимо установить небольшую высоту полета.

*Место взлета и посадки*

Определяются как путевые точки вне области миссии. На этих участках не должно быть препятствий, а также должны быть учтены скорость и направление ветра. Наложения:

Для создания цифровых моделей поверхности изображения получаются с наложением. Продольное и поперечное перекрытия гарантируют, что общая область отображается на двух последовательных или соседних изображениях, что позволяет получать стереоизображения, из которых создается цифровая модель.

Параметр перекрытия аэрофотоснимков необходимо устанавливать исходя из характеристик беспилотных летательных аппаратов, но не менее 60 % в продольном и 40 % в поперечном направлениях. Для исключения ошибок при построении цифровых моделей и ортофотопланов, которые возникают в результате недостаточного перекрытия снимков или наличия некачественных изображений, рекомендуется устанавливать среднее значение перекрытия кадров не менее 70 %.

**4. Проведение аэрофотосъемки.**

Аэрофотосъемка – фотографирование территории с определенной высоты при помощи аэрофотоаппарата, установленного на летательном аппарате, результатами которой могут быть ортофотопланы, карты и планы местности, цифровые модели поверхности, которые применяются в задачах проектирования и строительства транспортных объектов [11].

Для выполнения работ по аэрофотосъемке необходимо задание и план проводимых работ. Задание должно содержать:

– вид объекта и сведения о нем;

– тип строительства: новое строительство, демонтаж, реконструкция и т. д., а также этап проводимых работ;

– данные о местонахождении и границах объекта;

– требования к точности данных.

При проведении аэрофотосъемки с применением беспилотных летательных аппаратов необходимо учитывать факторы, которые могут препятствовать проведению работ:

– наличие растительности;

– сложные для последующей расшифровки элементы: одноцветные объекты, карнизы домов, загрязнения дорожного полотна, отражающие поверхности;

– сезонность, погодные условия;

– характер и высотность застройки.

Основной задачей беспилотного летательного аппарата является выполнение полетного задания, получение данных аэрофотосъемки и регистрация центров фотографирования. Этот набор данных является минимальным для дальнейшей обработки.

Полеты в автоматическом режиме по заранее проектируемым маршрутам позволяют уменьшить ошибки, возникающие при пилотировании, повысить безопасность работ. В качестве дополнительной информации необходимо производить запись данных телеметрии об отклонении беспилотника от выполнения заданных параметров. Объем и точность данных определяются требованиями программных продуктов обработки.

**5. Обработка полученных снимков.**

а) сбор полученных изображений с фотокамеры;

б) оценка качества полученных фотографий и их сортировка: отбраковка, при наличии, некачественных кадров: сделанных за пределами участка, на дугах разворота;

в) фотограмметрическая обработка полученных снимков (получение цифровой модели рельефа, ортофотоплана);

г) дешифрирование и составление цифровой модели местности.

В лабораторных условиях в качестве участка транспортной сети был использован тестовый полигон, на котором установлены препятствия. Для оценки эффективности идентификации при различных маршрутах облета беспилотного летательного аппарата выполнено 3 тестовых полета и наиболее эффективным оказался замкнутый кольцевой маршрут. Кадры, полученные в результате аэрофотосъемки, подлежат дальнейшей обработке с помощью Agisoft Metashape [10]. В первую очередь все полученные снимки визуально оценены, для исключения некачественных кадров, после чего загружены в программу и выровнены. Для более точного формирования модели уменьшается область построения модели, а также удаляются точки и снимки, расположение которых про-

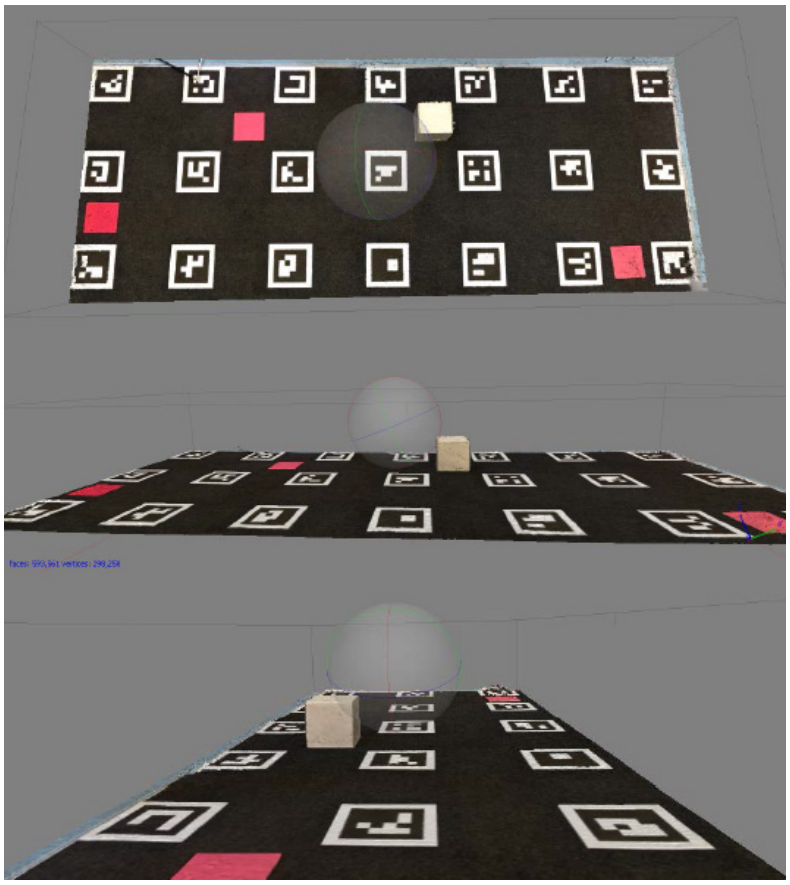


*Рис. 6. Трехмерная модель участка транспортной сети*

грамма определила неверно. Итоговая цифровая модель тестового полигона представлена на рис. 6.

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»).

В результате исследования выполнена и успешно протестирована программа, выполняющая автономный полет и аэрофотосъемку. Наиболее результативным маршрутом оказался замкнутый кольцевой маршрут, поскольку позволяет обеспечить большее перекрытие снимков. Результаты проведения аэрофотосъемки обладают высоким качеством и позволяют сразу после совершения аэрофотосъемки преобразовать в цифровую модель поверхности. Модель может использоваться для обнаружения дефектов, составления карт высот, транспортного планирования.

Успешно проведенные лабораторные исследования позволяют сделать вывод о необходимости применения цифровых моделей на реальных объектах транспортной инфраструктуры. Кроме того, обоснована эффективность применения беспилотных летательных аппаратов для их создания. Развитие городской среды и необходимость проектирования новых элементов транспортной инфраструктуры требует совершенствования существующих методов анализа и проектирования транспортной инфраструктуры. Создание цифровых платформ транспортной мобильности может стать качественно новым инструментом для анализа и принятия решений.

## Библиографический список

1. *Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Кириченко А. В.* Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования // Вестник Государственного универ-

ситета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2016. № 3 (37). С. 7–15.

2. Forecasting of the route network of ferry and cruise lines based on simulation and intelligent transport systems / N. Maiorov, V. Fetisov, S. Krile, D. Miskovic // Transport Problems. 2019. Vol. 14 (Issue 2). P. 111–123.

3. *Сильянов В. В., Еремин В. М., Муравьева Д. И.* Имитационное моделирование транспортных потоков в проектировании дорог. М.: МАДИ, 1961. 119 с.

4. *Tesselkin A., Tesselkina K., Khabarov V.* Elements of data mining for the development of mathematical transport models // Actual problems of electronic instrument engineering. 2016. Vol. 1. Part. 2. P. 354–357.

5. *Якимов М. Р.* Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов: монография. М.: Логос, 2013. 188 с.

6. Цифровая модель местности – определение, виды, порядок построения. URL: https://gektargroup.ru/articles/geodeziya/tsifrovaya-model-mestnosti (дата обращения: 30.11.2021).

7. ГОСТ Р 52440-2005. Модели местности цифровые. Общие требования. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200044676 (дата обращения: 30.11.2021).

8. Создание высокоточной трехмерной модели Тульской области. URL: https://www.geoscan.aero/ru/blog/opyt-gk-geoskansozdanie-vysokotochnoy-trekhmernoy-modeli-tulskoy-oblasti (дата обращения: 30.11.2021).

9. Defining the mission area. URL: https://www.stars-project.org/en/knowledgeportal/magazine/uavtechnology/flight-planning/defining-the-mission-area (дата обращения: 30.11.2021).

10. Agisoft Metashape. Руководство пользования. URL: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_ru.pdf (дата обращения: 30.11.2021).

11. Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования. URL: https://www.geoscan.aero/sites/default/files/inlinefiles/ %D0 %93 %D0 %9E %D0 %A1 %D0 %A2 %20 %D0 %90 %D0 %A4 %D0 %A1_ %D0 %B2 %D1 %82 %D0 %BE %D1 %80 %D0 %B0 %D1 %8F %20 %D1 %80 %D0 %B5 %D0 %B4 %D0 %B0 %D0 %BA %D1 %86 %D0 %B8 %D1 %8F.pdf (дата обращения: 30.11.2021).

**УДК 656.7.043** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-65**

***Д. А. Елкина****
*студентка*
***Н. Н. Майоров****
*доктор технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА В АЭРОПОРТАХ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ

*Данная статья будет опираться на конструктивные данные по пассажиропотоку в аэропорту Пулково за летний период. Период после спада ограничительных мер, по причине короновирусной инфекции, привел к большому и неожиданному потоку людей в аэропорту Пулкова. Влияние множества различных факторов побуждает к незамедлительным решениям проблем. В статье рассматривается решение задачи моделирования обслуживания пассажиров в аэропорту на основе логистической регрессии.*
***Ключевые слова:*** *COVID-19, коронавирусная инфекция, регистрация, аэропорт, влияние COVID-19, авиакомпании, регистрация на рейс.*

***D. A. Elkina****
*Student*
***N. N. Majorov****
*Dr. Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# INVESTIGATION OF PASSENGER TRAFFIC DISTRIBUTION AT AIRPORTS BASED ON LOGISTIC REGRESSION

*This article will be based on constructive data on passenger traffic at Pulkovo airport for the summer period. The period after the recession of the restrictive measures of the Coronavirus infection led to a large and unexpected flow of people at Pulkovo airport. The influence of many different factors prompts immediate solutions to problems.*
***Keywords:*** *COVID-19, coronavirus infection, onboarding, airport, impact of new coronavirus, airline company, flight check-in.*

## Распределение пассажиропотока в аэропорту Пулково

Скопление очередей стали проблемным составляющим для работающего персонала аэропорта. Регистрация затягивалась из-за большого скопления людей, таких как семей с детьми, делегациями, спортивными командами и т. д. Регистрация одной семьи в составе 3 человек занимает от 5 до 6 минут на стойках регистрации.

Несмотря на общее кризисное состояние отрасли, внутренние авиаперевозки в некоторых крупных странах продемонстрировали отскок уже во 2 квартале 2020 года, что было связано со смягчением карантинных мер и постепенным возобновлением активности по перевозкам. К ним относятся Россия и Китай, которые уже в 3 квартале 2020 года достигли сопоставимого с 2019 годом уровня пассажирооборота, причем российскому авиарынку даже удалось выйти в положительную зону в августе-сентябре [1].

За период с января по сентябрь пассажиропоток аэропорта Пулково составил более 13 миллионов пассажиров на внутренних и международных направлениях.

Отмена масштабных ограничительным мер к началу лета 2021 года совпала с периодом летних отпусков, ЕВРО-2020 и Петербургского международного экономического форума. В результате спрос на ряд внутренних и международных направлений в России начал стремительно расти и уже во втором полугодии 2021 года превысил показатели 2019 года за такой же период [2]. Показатель пассажиропотока через аэропорт Пулково за январь – июнь 2019 года составил 8 767 773 пассажира. Когда за этот же период 2021 года пассажиропоток составил около 7,5 млн пассажиров.

*Таблица 1*

**Объемы перевозок через аэропорт Пулково за период январь-сентябрь 2021 года на регулярных и нерегулярных рейсах**

| Аэропорт | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Январь-Сентябрь |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Санкт-Петербург (Пулково) | 925 306 | 836 219 | 1 072 041 | 1 219 863 | 1 517 376 | 1 854 898 | 2 028 419 | 2 135 541 | 1 896 194 | **13 485 857** |

*Таблица 2*

**Объемы перевозок через аэропорт Пулково за период январь-декабрь 2020 года на регулярных и нерегулярных рейсах**

| Аэропорт | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | **За 2020 год** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Санкт-Петербург (Пулково) | 1 328 413 | 1 173 724 | 964 874 | 111 212 | 136 355 | 434 960 | 1 094 985 | 1 522 827 | 1 385 622 | 1 141 810 | 821 409 | 828 230 | **10 944 421** |

Высокая нагрузка на туристическую и транспортную инфраструктуру последовали желаниям пассажира выбирать направления на туристические курорты России. Летний сезон 2021 года стал самым удачным для российских направлений: пассажиропоток в аэропортах вырос на десятки процентов по итогам 9 месяцев относительно аналогичных показателей 2019 года. Решение многих проблем затрагивает неуспешной работы аэропорта. Работа на приделе своих возможностей. Крайнее загруженность отдела пассажирских перевозок, а именно стоек регистрации демонстрирует отставание в решении проблем с обслуживанием пассажиров.

Авиакомпании «Победа» – доминирующего лоукостера на российском рынке, выросла в последние года. Регистрации на направления компании «Победа» стали самыми масштабными и заполненными в аэропорту Пулково [4]. По статистике агент отдела пассажирских перевозок на регистрацию одного пассажира тратит 1,5 мин. [4]. Чтобы разобраться с распределением нагрузки на работу пассажирского отдела и отдела багажа, а также облегчить скорость предоставления услуг по регистрации необходимо разработать анализ и стратегию.

## Процесс создания и реализации идеи управлением отдельной группы отправляющихся людей и организация работы стоек регистрации в аэропорту

Введем исходные данные и выполним моделирование ситуации. Группа из 20 пассажиров, прибывших в аэропорт (каждый имеет при себе багаж – не ручную кладь), спешит на самолет одной авиакомпании. Перед ними еще 50 человек и все стоят на разные рейс, но одной и той же компании. Не зависимо от того успевает пассажир на рейс или нет, каждый обслуживается в порядке очереди. Задача агентов стоек регистрации зарегистрировать пассажиров до окончания посадки. Какова вероятность у пассажиров успеть на самолет, если регистрация закроется через 40 мин. Как время, потраченное на регистрацию, влияет на вероятность успеть на самолет?

*Рис. 1. Очереди в аэропорту Пулково (29.06.2021)*

Причина использования логистической регрессии для этой проблемы заключается в том, что значения зависимой переменной, проходящей и не проходящей, хотя и представлены «1» и «0», не являются кардинальными числами. Если проблема изменена таким образом, что «0» – не прошел регистрацию «1» – прошел регистрацию, был заменен на оценку работы от 0 до 100 (кардинальные числа), то можно было бы использовать простой регрессионный анализ [3]. Предположим, что на одного пассажира агент тратит не более 2 мин. для приветствия, приема багажа и внесения данных для посадочного билета [4].

Разработка статистики на ожидание в очереди на регистрацию, у пассажира составляет от

*Таблица 3*

**Время, потраченное на ожидание в очереди у пассажира**

| Время ожидания, мин. | 35 | 37 | 29 | 41 | 23 | 43 | 36 | 39 | 41 | 42 | 43 | 40 | 45 | 30 | 37 | 38 | 40 | 41 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Успел или не успел на регистрацию | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

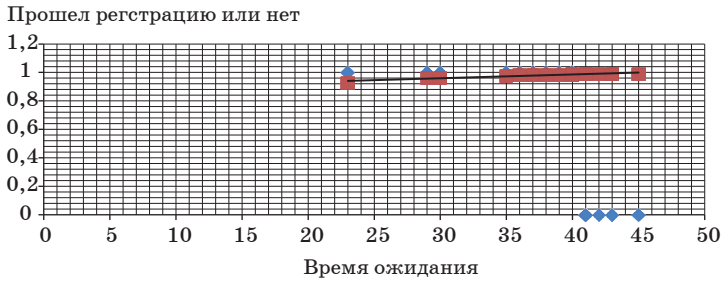



*Рис. 2. График кривой логистической регрессии, показывающий вероятность попасть на рейс до закрытия на регистрацию*

30 до 45 мин. В таблице показано количество часов, потраченных на каждого пассажира, и независимо от того, успели ли они (1) или не успели (0) зарегистрироваться

График показывает вероятность пройти регистрацию в зависимости от времени ожидания, при этом кривая логистической регрессии соответствует данным (рис. 2).

Анализ логистической регрессии дает следующий результат. Для пассажира, который проходит регистрацию на сойке регистрации 2 мин., ввод значения {\displaystyle {\ text{Hours}}=2} в уравнение дает оценочную вероятность пройти регистрацию 0,36616:

$$P(x) = \frac{1}{1+e^{-L}} = \frac{1}{1+1,57143} = 0,36616,$$

где $P(x)$ – логистическая функция [5]; $e^{-L}$ – экспоненциальная функция (математическая функция).

Откуда получаем

$$L = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 = \\ = 0,1671 + 0 * 40 + 0,19352 * 2 = 0,55414,$$

где $L$ – логарифмический коэффициент расчета параметров модели; $x_1$ – время до закрытия регистрации на рейс; $x_2$ – время регистрации пассажира (цифра меняется в интервалах от 30 секунд до 2 мин.); $b_0, b_1, b_2$ – параметры модели.

Вероятность составит 36 % успеха успеть на регистрацию.

Аналогично, для пассажиров, который проходит регистрацию до 0,5 минуты, расчетная вероятность 0,42574. То есть 42 % составит шанс попасть на регистрацию на свой самолет [6].

Логистическая функция представляет собой S-образную кривую, которая принимает любые реальные входные данные и выводит значение между нулем и единицей. Для логарифмического коэффициента это интерпретируется как учет логарифмических коэффициентов и вероятности вывода. Графики на рис. 3–5 показы-

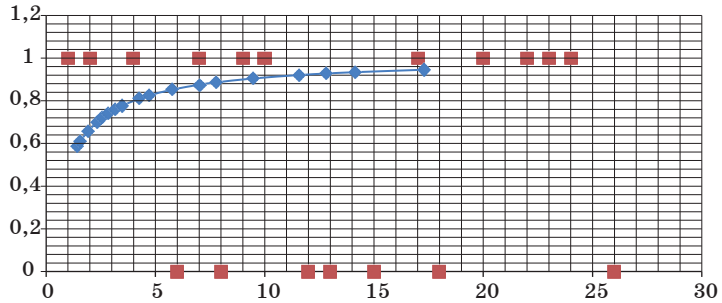



*Рис. 3. График кривой логистической регрессии (от 1 до 30 мин. ожидания очереди)*

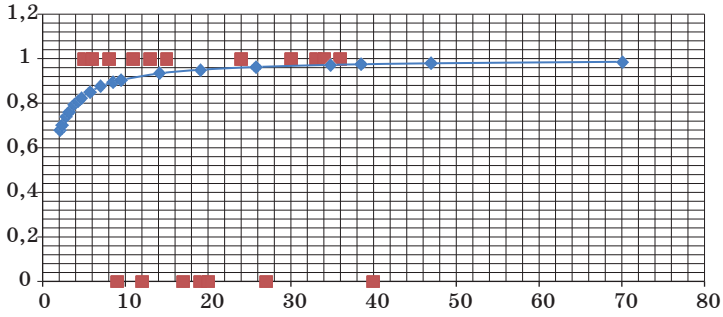



*Рис. 4. График кривой логистической регрессии в ожидании от 5 до 40 мин. в очереди*

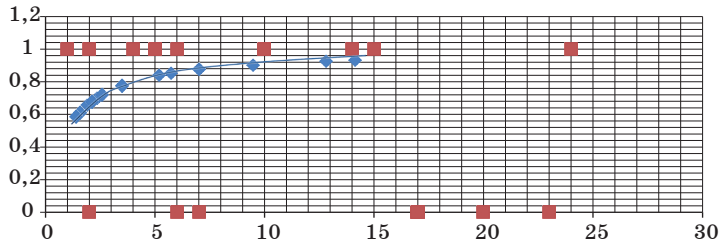



*Рис. 5. График кривой логистической регрессии (от 1 до 24 мин. ожидания очереди)*

вают вероятность сдачи багажа, и получения посадочного билета, в зависимости от количества времени, проведенного в ожидании, при этом кривая логистической регрессии соответствует данным.

Графики различных вариантов моделирования (рис. 3–5).

Представленное моделирование реализовано в виде отдельного файла на языке Python. Задачи, которые будет решать новый аналог помощи для работников:

1. Прогноз ожидания пассажиров в аэропорт каждые 30 мин. Расчет вероятности, сколько пассажиров прибудет в зал терминала в ближайшие 2–3 часа. Это позволит сориентировать сотрудников о потребной рабочей силе.

2. Какое количество пассажиров необходимо обслужить, чтобы не случились сбои/несчастные случаи/катастрофы. Все этих расчетов необходимо для определения количества и затрат на работу всей системы аэропорта. Для устранения перебоев работы предприятия.

3. База данных о том, сколько пассажиров остается обслужить (от момента прибытия в аэропорт и до прибытия в другой аэропорт).

Эта технологически грамотная среда позволит разделить сложную систему аэропорта на ряд услуг информационного обслуживания, которые могут быть использованы в качестве интерфейсов прикладного программирования. В свою очередь это обеспечит экосистему, в которой все процессы будут осуществляться намного проще благодаря слаженной работе [7].

Такой прогноз поможет разобраться с такими частыми перебоями как отмена самолета из-за погодных условий. При выявлении прогноза на туманность, сильный шторм или глобальные происшествия система интерфейсов прогноза выдает новые варианты развития событий в системе аэропортов (принимающих и отправляющих). Как затрагивает пассажира такой интерфейс. При высокой вероятности, что рейс отменен или его переносят. Пассажира уведомляют об определенных изменениях. Также и с очередями на стойки регистрации. Каждый пассажир обслуживаемый той или иной компанией или транспортным узлом (аэропортом) получает уведомлении о желательно прибытии в аэропорт в определенное время [8], [9].

## Заключение

На основе использования логистической регрессии решается задача оценки загрузки отдельных служб аэропорта, к примеру, стоек регистрации. В представленном исследовании разобрана ситуация регистрации пассажиров, приведены данные по опоздавшим пассажирам и выполнено моделирование различных ситуаций. На основе моделирования лица принимающие решения имею возможность спрогнозировать среднюю загруженность стоек регистра-

ции. Представленное решение необходимо использовать с средами имитационного моделирования.

**Библиографический список**

1. The International Air Transport Association (IATA). URL: https://www.iata.org/en/programs/cargo/cargo---covid–19---news/ (дата обращения: 15.10.2021).

2. Flightradar 24. URL: // https://www.flightradar24.com (дата обращения: 10.08.2021).

3. A Beginner's Guide to End to End Machine Learning. URL: https://towardsdatascience.com (дата обращения: 19.09.2021).

4. Аэропорт Пулково. URL: https://pulkovoairport.ru/about/reports (дата обращения: 14.11.2021).

5. Measures of Fit for Logistic Regression Paul D. Allison, Statistical Horizons LLC and the University of Pennsylvania: 2014. 12 p.

6. *Уотерс Д.* Логистика. Управление цепью поставок. М., 2003. 504 с.

7. В октябре 2021 года российские авиакомпании перевезли 11 млн пассажиров. URL: https://aeroo.ru/airports/ (дата обращения: 27.11.2021).

8. Aviation Technology and Innovation. URL: https://www.aerotime.aero/aviation-technology-and-innovation-news (дата обращения: 23.11.2021).

9. *Майоров Н. Н., Фетисов В. А., Гардюк А. Н.* Технологии и методы моделирования пассажирских перевозок на воздушном транспорте: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2014. 215 с.

**УДК 656.025** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-70**

***В. В. Зеленцова****
*магистрант*
***Н. А. Слободчиков****
*кандидат военных наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА В СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДАХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

*В данной статье рассматриваются кооперативные транспортные системы как новый современный способ организации дорожного движения. Проведен сравнительный анализ интеллектуальных транспортных систем и кооперативных транспортных систем. В результате проведенного анализа выявлены преимущества кооперативных транспортных систем, способные обеспечению более высокой безопасности дорожного движения, особенно в городских условиях организации дорожного движения.*
***Ключевые слова:*** *организация дорожного движения, транспортная инфраструктура, интеллектуальная транспортная система, радиотехнологии, безопасность дорожного движения.*

***V. V. Zelentsowa****
*Postgraduate Student*
***N. A. Slobodchikov***
*PhD of Military Sc., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# PROBLEMS OF TRAFFIC ORGANIZATION IN MODERN CITIES AND WAYS TO SOLVE THEM

*This article discusses cooperative transportation systems as a new modern way of organizing road traffic. A comparative analysis of intelligent transport systems and cooperative transport systems has been carried out. As a result of this analysis, the advantages of cooperative transportation systems that can provide better road safety, especially in urban traffic management.*
***Keywords:*** *traffic management, transport infrastructure, intelligent transport system, radio technologies, road safety.*

С каждым годом во всем мире интенсивность дорожного движения в городах постоянно возрастает. При этом существующая улично-дорожная сеть не способна обеспечивать пропускную способность, в связи с постоянным ростом уровня автомобилизации. В результате возникает большое количество конфликтных ситуаций, которые негативно сказываются на мобильности населения. Строительство новых скоростных магистралей не поможет решить данную проблему, а только наоборот приведет к возникновению новых узких мест.

Одним из способов решения данной проблемы является внедрение интеллектуальной транспортной системы. Данная система включает в себя информационные, коммуникационные и управленческие технологии, встроенные в непосредственно в дорожную инфраструктуру и (или) транспортные средства. Такое сочетание позволяет улучшить эффективность использования существующей транспортной инфраструктуры.

Мировая тенденция в использовании цифровых технологий быстро развиваются последние десятилетия и все чаще внедряются на транспорте. Интеллектуальные транспортные системы (ИТС) нацелены на предоставление услуг, связанных с различными видами транспорта и управления движением, позволяют пользователям быть лучше информированы и делать более безопасное, скоординированное и «разумное» использование транспортных сетей. Они включают передовую телематику и гибридную связь, включая связь на основе IP, а также прямую связь Ad-Hoc между транспортными средствами и между транспортными средствами и инфраструктурой. Интеллекту-

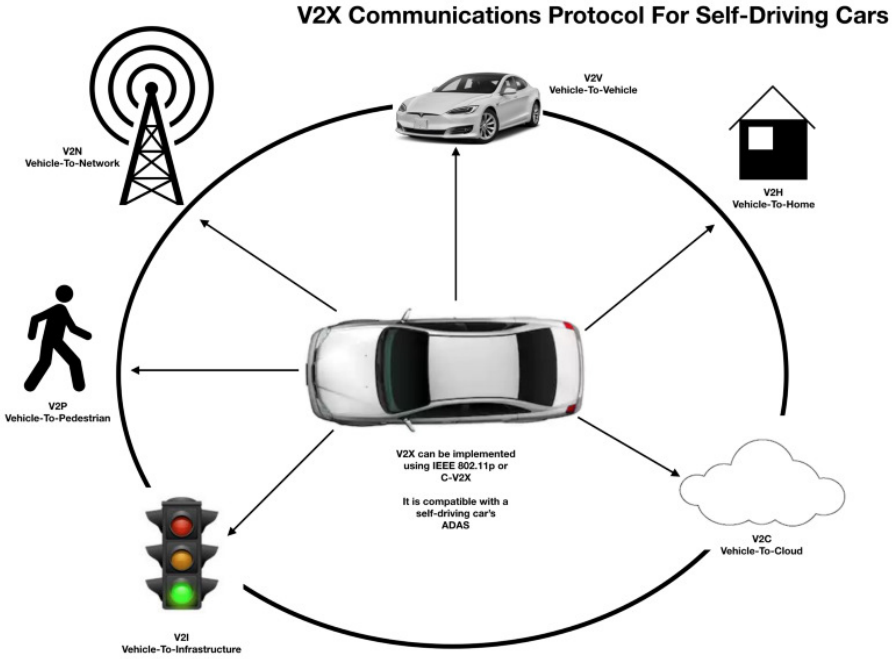



*Рис. 1. Пример функционирования совместных интеллектуальных транспортных систем*

альная транспортная система включает в себя широкий спектр приложений, которые обрабатывают и обмениваются информацией для облегчения заторов, улучшения управления движением, минимизации воздействия на окружающую среду и увеличения преимуществ транспорта для коммерческих пользователей и общественности в целом.

В настоящее время получают широкое распространение C-ITS системы, которые несколько отличаются от обычных интеллектуальных транспортных систем (ITS), которые сосредоточены на цифровых технологиях, обеспечивающих интеллектуальные данные, размещенные на обочине дороги или в транспортных средствах, тем, что фокусируется на связи между интеллектуальными системами установленными, как на инфраструктуре, так и на транспортных средствах. Другими словами, связывают их с друг другом в единое целое.

Что же такое C-ITS – это совместные интеллектуальные транспортные системы (C-ITS), они относятся к транспортным системам, в которых взаимосвязь между двумя или более подсистемами ITS (персональная, автомобильная, придорожная и центральная) позволяет и предоставляет услугу ITS, которая предлагает лучшее качество и улучшенный уровень обслуживания, по сравнению с той же услугой ITS, предоставляемой только одной из указанных подсистем ITS.

Как правило, совместные интеллектуальные транспортные системы (C-ITS) (рис. 1) базируются на специальных технологиях ближнего действия (например, ETSI ITS G5) и дополняющих технологиях глобальной связи (например, 3G, 4G, 5G), которые позволяют дорожным транспортным средствам обмениваться данными с другими транспортными средствами, сигналами светофора, придорожной инфраструктурой и другими участниками дорожного движения. Кроме того, могут использоваться такие системы как V2X для связи между транспортными средствами (V2V), а также V2I и V2P для связи между транспортными средствами и инфраструктурой [1]. Другими словами, беспроводной обмен данными между различными участниками дорожного движения и станциями ITS, связанные в единый функционал называются совместной связью V2X. Он поддерживает ряд информационных, предупреждающих и вспомогательных служб, которые будут постепенно развиваться в ближайшие годы.

Представители компании CAR 2 CAR Communication Consortium предполагают развитие C-ITS на основе совместной связи V2X ближнего действия, которая работает повсюду в любое время через локальные одноранговые сети в диапазоне 5,9 ГГц. Эта так называемая кооперативная связь V2X использует европейский стандарт ETSI ITS G5, который основан на стандарте WLAN IEEE 802.11p для амери-

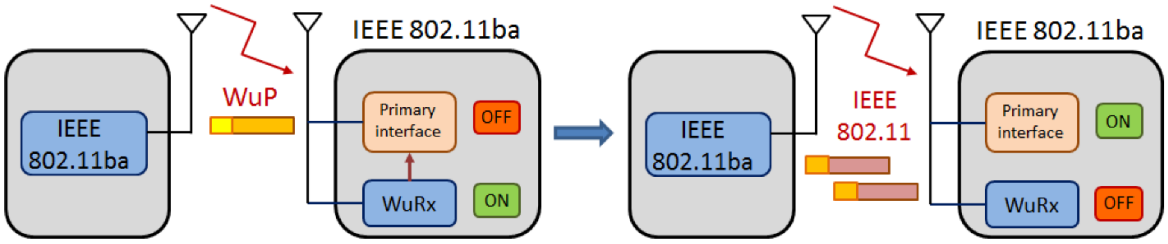



*Рис. 2. Схема работы совместной связи V2X*

канского рынка, специально разработанном для автомобильных приложений [2]. Преемник стандарта IEEE 802.11bd (рис. 2) предлагает улучшенные характеристики и плавное развитие радиотехнологии, которая обеспечивает эффективное использование выделенного спектра, непрерывную работу. По сравнению с другими коммуникационными технологиями ETSI ITS G5 демонстрирует некоторые функции, хорошо разработанные для приложений, связанных с безопасностью:

– локально самоорганизующиеся специализированные сети, работающие везде в любое время;

– бесплатная передача данных (не требующая подписки);

– надежность, производительность, требования функциональной безопасности и независимость от сторонних коммерческих решений и других коммерческих сетей связи.

Ограниченный диапазон связи ETSI ITS G5 дополнительно поддерживает конструктивные особенности для соответствия требованиям конфиденциальности с учетом европейского GDPR [3].

В варианте кооперативного дорожного движения коммуникационные блоки V2X – так называемые станции ITS – реализованы в транспортных средствах и транспортной инфраструктуре и обмениваются данными друг с другом через специализированную сеть малого радиуса действия V2X. Несколько раз в секунду бортовые устройства транспортных средств передают такие данные, как их местоположение, скорость и направление движения. Кроме того, они отправляют инициируемые событиями сообщения об особых происшествиях, таких как экстренное торможение, неисправность автомобиля или обнаруженная скользкая дорога. Так называемые придорожные единицы в транспортной инфраструктуре информируют, например, о фазах сигнала светофора, ограничениях скорости или дорожных работах.

Элементы данных и форматы этих сообщений стандартизированы и согласованы, чтобы автомобили разных производителей и брендов могли общаться друг с другом. Чтобы обеспечить конфиденциальность участников дорожного движения, сообщения анонимизируются с помощью регулярно меняющихся псевдонимов, избегая длительного отслеживания.

Преимуществом совместных систем V2X для безопасности дорожного движения и его эффективности является то, что в них анализируются полученные данные и предупреждаются водители об опасностях, например, если он приближается к концу затора или строительной площадке, или если впереди идущий автомобиль резко тормозит. Таким образом, совместные системы V2X поддерживают равномерное безопасное вождение, отображают опасности, даже невидимые для водителя, и помогают избежать аварий. Для водителя обмен данными остается совершенно незамеченным, пока не возникнет опасность. Взаимодействие между участниками дорожного движения, например, для поддержки слияния полос, будет обеспечено там, где это потребуется, с помощью будущих стандартизированных наборов сообщений.

Обмен совместными данными V2X между участниками дорожного движения и с инфраструктурой работает везде и всегда, когда пользователи подходят ближе друг к другу. За счет уменьшения расстояния между взаимодействующими пользователями качество совместной связи V2X улучшается. Благодаря этому принципу можно избежать критических ситуаций, приводящих к авариям. Транспортные средства с ручным управлением получают выгоду от совместной работы V2X, а также от всех уровней поддержки и автоматизации, включая и полностью автономные автоматизированные транспортные средства [4].

Предоставление информации о фазах сигналов светофора и их прогнозируемых изменениях или препятствиях на маршруте в режиме реального времени, способствует повышению уровня безопасности дорожного движения и качества транспортного обслуживания. Благодаря полученной информации водитель сможет

избегать резких ускорений или замедлений, что в свою очередь кроме безопасной езды поможет снизить потребление топлива транспортными средствами и уменьшить шум и выбросы.

Сложные датчики транспортных средств и дорожной инфраструктуры способны обнаруживать других участников дорожного движения. В случае если обнаруженный участник дороги не оснащен системой V2X, кооперативные системы Day 2+ будут передавать информацию об объекте через сообщение коллективного восприятия. Таким образом, совместные услуги V2X также связаны с повышением безопасности уязвимых участников дорожного движения (VRU), комфорта вождения, эффективности движения и воздействия транспорта на окружающую среду [5].

Таким образом, направление C-ITS развивается с целью перехода к безаварийному движению (нулевое смертности). Для достижения этой цели этапы инновационной деятельности C-ITS основаны друг на друге и поддерживают все уровни автоматизации. Услуги первого уровня сосредоточены на обмене информацией, повышающей «дальновидность» вождения. Услуги второго уровня улучшают качество обслу-

*Таблица 1*

**Услуги C-ITS в фазе I платформы C-ITS**

| № п/п | Использование услуги | Управление | Описание |
|---|---|---|---|
| 1 | Зеленый приоритет | Управляется | Эта услуга предоставляет приоритет определенным участникам дорожного движения и оказывает негативное влияние на других участников дорожного движения. Особенно в условиях, близких к насыщению, эта услуга должна быть отключена, поскольку она даже снижает производительность для приоритетных транспортных средств, когда образуется пробка. Побочным эффектом может быть то, что другие транспортные средства с тем же маршрутом могут присоединиться к взводу с приоритетным транспортным средством, однако, если это является целью, традиционная «зеленая волна» ИТС или приоритет маршрута будут более эффективными |
| 2 | Зеленый свет оптимальная скорость | Всегда включена | Эта услуга снижает выбросы вредных веществ в атмосферу. При возникновении пробки совет невозможен, так как учитывается длина очереди и вмешательство не требуется |
| 3 | Бортовые указатели | Всегда включена | Предоставляется информация, которую также можно увидеть, глядя на обычные знаки |
| 4 | Бортовое динамическое ограничение скорости | Всегда включена | Эта услуга должна использоваться в сочетании с традиционной услугой ИТС, иначе необорудованные транспортные средства не будут ее соблюдать. Управление должно осуществляться с помощью традиционной услуги, в то время как аналог C-ITS информирует участников дорожного движения по дополнительному каналу |
| 5 | Доступность парковок на автомагистралях/ в городах | Всегда включена | Главная цель должна заключаться в том, чтобы предотвратить лишнее время, затрачиваемое на поиск места для парковки |
| 6 | Управление временем отдыха | Вмешательство | Диспетчер может использовать специальные стимулы, чтобы убедить водителей сделать перерыв на отдых раньше, чтобы уменьшить поток транспорта при образовании пробки. Однако сомнительно, сколько автомобилей можно привлечь в первую очередь и убедить во вторую |
| 7 | Режим и советы по поездке | Вмешательство | В своей базовой версии это чисто информационная услуга, которая должна давать справедливое представление о вариантах поездок, чтобы сохранить доверие пользователей. Однако как и в случае с управлением временем отдыха, можно ввести специальные стимулы для достижения модального сдвига для особых событий |
| 8 | Зондирование данных о транспортных средствах | Всегда включено | Эта служба предоставляет информацию для диспетчера и не влияет непосредственно на транспортный поток |
| 9 | Медленное или неподвижное транспортное средство | Всегда включено | Аварии могут быть предотвращены с помощью этой услуги, и негативного эффекта никогда не будет |
| 10 | Предупреждение о слепых зонах/VRU | Всегда включено | Аварии можно предотвратить с помощью этой услуги |

живания и обмениваются информацией о восприятии и осведомленности водителя. Третий уровень добавляет дополнительные сложные услуги, такие как обмен маневрами, поддержка переговоров и сотрудничества, которые способствуют совместному безаварийному автоматизированному вождению.

Внедрение систем V2X позволят уменьшить расстояние между машинами в потоке и в колонном строю за счет уменьшения расстояния между грузовиками для уменьшения сопротивления воздуха и снижения расхода топлива.

Такой принцип взводов может применяться на автомагистралях, а также на совместных перекрестках в городских районах для увеличения пропускной способности во время зеленой фазы светофора.

Развертывание совместных сервисов V2X происходит на различных этапах инноваций, начиная с первого уровня базовый набор информационных и предупреждающих сервисов поддерживает низкие уровни проникновения участников дорожного движения, способных к C-ITS, во время вывода на рынок.

В настоящее время сервисы первого уровня развертываются и уже доступны на транспортных средствах. Услуги, относящиеся к этапам 2 и 3+, исследуются в проектах НИОКР, которые генерируют знания для разработки соответствующих настраиваемых функций и стандартов. После тестирования и демонстрации новых функций и технологий, инновации используются для стандартизации и профилирования на следующем этапе развертывания.

Влияние услуг C-ITS на дорожную сеть может быть значительным, но его трудно оценить из-за новизны концепции. Одним из ключевых факторов, влияющих на воздействие, является уровень проникновения транспортных средств, оснащенных C-ITS, и уровень их соответствия, где это применимо. Для определения влияния услуг C-ITS на дорожную сеть проводится качественный анализ показателей с целью определения целесообразности внедрения услуг C-ITS (табл. 1) [6].

## Варианты реализации C-ITS на основе совместных сервисов V2X

*Осведомленность вождения*

Обмен данными о состоянии через совместную связь V2X, например, о положении, скорости, направлении движения или особых происшествиях, таких как неисправность транспортного средства, позволяет получить набор информационных и предупреждающих услуг

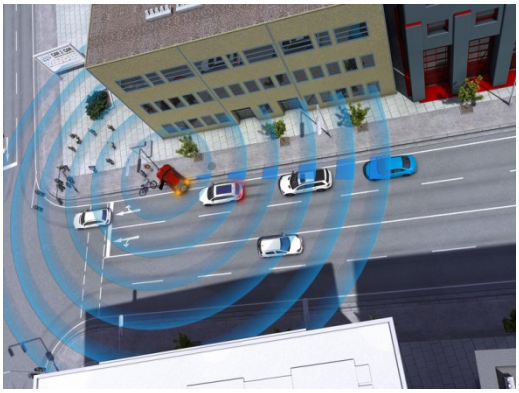


*Рис. 3. Пример работы системы*

(рис. 3). Они поддерживают участников дорожного движения в дальновидном вождении и осознают потенциальные риски, которые им еще не видны предупреждения [7]:

– о столкновении на перекрестке;
– о аварийном транспортном средстве;
– об опасной ситуации;
– о неподвижном автомобиле;
– о пробках;
– до/после сбоя.

– Помимо данных о состоянии, совместные участники дорожного движения с поддержкой V2X могут обмениваться наблюдениями, полученными с помощью датчиков, и расширенной экологической информацией (рис. 4). Таким образом, других участников дорожного движения не только предупреждают об опасностях, которые они пока не видят. Кроме того, не общающиеся участники дорожного движения принимаются во внимание и защищены в различных дорожных ситуациях:

– предупреждение об обгоне;
– расширенное предупреждение о столкновении на перекрестке;

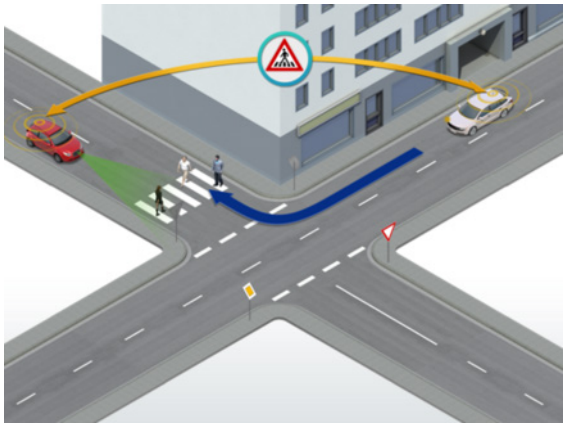


*Рис. 4. Предупреждение о невидимой опасности*

*Рис. 5. Пример резервирование территории*

– предупреждение для уязвимых участников дорожного движения;

– совместный адаптивный круиз-контроль;

– предупреждение о долгосрочных дорожных работах;

– приоритет для специальных транспортных средств.

Помимо данных о состоянии и датчиках, совместные участники дорожного движения V2X также могут предоставлять данные о намерениях, позволяя им разумно взаимодействовать и координировать свое поведение даже в сложных дорожных ситуациях (рис. 5). Прогнозирование ожидаемого поведения всех участников дорожного движения является важным требованием для достижения долгосрочной цели – высокоавтоматизированного и автономного вождения:

– (статический или динамический) взвод;

– резервирование территории;

– кооперативное слияние;

– совместная смена полосы движения;

– совместный обгон.

Таким образом, развитие услуг C-ITS приведет к обеспечению более высокой безопасности дорожного движения, особенно в городских условиях организации дорожного движения.

**Библиографический список**

1. *Григорьев В. А., Хворов И. А.* Автомобильные сети: будущее не загорами // Радиочастотный спектр. 2012. № 5. 80 с.

2. *Кузнецов В. И., Распаев Ю. А., Тараканов С. А.* Особенности проектирования элементов ИТС в рамках реализации пилотной зоны // Электросвязь. 2013. № 103.

4. *Власов В. М., Ефименко Д. Б., Богумил В. Н.* Транспортная телематика в дорожной отрасли: учеб. пособие. М., 2013. 80 с.

5. Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5855 MHz to 5925 MHz frequency band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the RTTE Directive Final draft ETSI EN 302 571 V1.1.1 (2008-09). European Telecommunications Standards Institute, 2008.

6. IEEE Standard for information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part. 11; Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments; IEEE 802.11. 2012.

7. IEEE 1609.2-2006 – Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Security Services for Applications and Management Messages 37 802. 11 p.

**УДК 656.073.2** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-76**

***О. А. Изотов****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА В ЗАДАЧАХ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

*Рассмотрена возможность оценки эффективности работы морского контейнерного терминала по дальнейшей оправке грузов, прибывших морем с помощью линейного программирования. Решение основано на выборе показателя эффективности (целевой функции) продиктованной целевой направленностью рассматриваемых операций.*
***Ключевые слова:*** *исследование операций, сборные грузы, контейнерные технологии, линейное программирование.*

***O. A. Izotov****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# EVALUATION OF CONTAINER TERMINAL CAPABILITIES IN LINEAR PROGRAMMING PROBLEMS

*The possibility of evaluating the efficiency of the sea container terminal for the further shipment of goods arriving by sea using linear programming is considered. The decision is based on the choice of an efficiency indicator (objective function) dictated by the target orientation of the operations under consideration.*
***Keywords:*** *operations research, combined cargo, container technologies, linear programming.*

## Введение

Математические методы, широко применяемые в исследовании операций основаны на выборе показателя эффективности (целевой функции) продиктованной целевой направленностью рассматриваемых операций. При этом, если условия проведения операций известны заранее (детерминированный случай), то есть исход полностью определен алгоритмом, значениями входных переменных и начальным состоянием системы, то показатель эффективности как правило только от двух групп параметров: заданных условий $a$ и элементов решения $x$.

Рассмотрим возможность оценки эффективности работы морского контейнерного терминала по дальнейшей оправке грузов, прибывших морем с помощью линейного программирования.

## Обсуждение

Возможности морского контейнерного терминала по отправке сборных партий грузов в глубь материка ограничены возможностями смежных видов транспорта и упаковкой таких грузов [1].

С территории порта малые партии грузов могут быть отгружены в прибывших контейнерах, в вагонах железнодорожного транспорт и автомобильным транспортом. При этом, сроки отправки грузов ограничены требованиями грузополучателей, возможностями смежных видов транспорта по их выводу и существенно влияют на стоимость дальнейшей транспортировки [2].

Современный морской терминал можно рассмотреть, как систему с располагающую потенциальными возможностями по отгрузке сборных грузов с применением контейнерных технологий и в тарно-штучном виде [3]. Возможности обеих технологий перевозок зависят от количества и вида подвижного состава, подаваемого в порт за период организации отгрузки. Так, отправка грузов в контейнерах $N_1$ потребует предоставления контейнерных железнодорожных платформ и специальных автоприцепов, а для отправки тарно-штучных грузов потребуются крытые вагоны $N_2$. Таким образом, каждый из видов транспорта потребует времени на проведение как минимум трех технологических операций: выгрузки $T_1$, перевозки $T_2$ и погрузки $T_3$ на смежный транспорт [4].

*Таблица 1*

| Вид технологии перевозки | Операции, обеспечивающие перевозку | | |
|---|---|---|---|
| | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ |
| В контейнерах | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ |
| В тарно-штучном виде | $a_{21}$ | $a_{22}$ | $a_{23}$ |

Продолжительность технологических операций $a_{ij}$ приведена в табл. 1 (первый индекс – вид транспорта, второй – вид операции).

Каждая технологическая операция обходится терминалу, а, следовательно, и заказчику, заинтересованному в снижении затрат по транспортировке, в определенную стоимость: первого вида $T_1$ – в расходы $c_1$, второго вида $T_2$ – в расходы $c_2$, третьего вида $T_3$ – в расходы $c_3$.

На период отправки грузов из порта, смежными видами транспорта выделено под обработку $b_1$ контейнерных платформ, $b_2$ средств автотранспорта и $b_3$ крутых вагонов. Количество обработанного подвижного таким образом, состава не должно превышать соответственно $\beta_1$, $\beta_2$ и $\beta_3$ единиц.

Кроме того, перед портом стоит задача полностью использовать возможности смежных видов транспорта. При этом, требуется так загрузить возможности терминала по проведению технологических операции $T_1$, $T_2$ и $T_3$, чтобы расходы терминала по их проведению свести к минимуму [5].

## Решение

Обозначим элементы решения буквами $x$ с двумя индексами (первый индекс – вид транспорта, второй – вид операции). В результате получим шесть элементов решения:

$$\left.\begin{matrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \end{matrix}\right\}. \quad (1)$$

Здесь $x_{11}$ – количество единиц подвижного состава первой технологии перевозки, занятых под технологическими операциями $T_1$, $x_{12}$ – количество единиц подвижного состава первой технологии перевозки, занятых под технологическими операциями $T_2$, и т. д.

Таким образом, сформулирована задача линейного программирования.

Запишем условия-ограничения, наложенные на элементы решения $x_{ij}$.

Теперь выполнение плана обработки подвижного состава можно выразить через три неравенства-ограничения:

$$\left.\begin{aligned} a_{11}x_{11} + a_{21}x_{21} &\geq b_1 \\ a_{12}x_{12} + a_{22}x_{22} &\geq b_2 \\ a_{13}x_{13} + a_{23}x_{23} &\geq b_3 \end{aligned}\right\}. \quad (2)$$

Ограничив перевыполнение плана обработки подвижного состава, получим еще три неравенства-ограничения:

$$\left.\begin{aligned} a_{11}x_{11} + a_{21}x_{21} &\leq \beta_1 \\ a_{12}x_{12} + a_{22}x_{22} &\leq \beta_2 \\ a_{13}x_{13} + a_{23}x_{23} &\leq \beta_3 \end{aligned}\right\}. \quad (3)$$

Теперь необходимо записать ограничения, связанные с возможностями оборудования и его полной загрузкой. Суммарное количество технологических операций, выполняемых в целях отправки сборных грузов с применением контейнерных технологий, должно быть равно $N_1$; а с отправкой тарно-штучных грузов – $N_2$.

Получаем еще два условия, но уже равенства:

$$\left.\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} &= N_1 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} &= N_2 \end{aligned}\right\}. \quad (4)$$

Теперь запишем суммарные расходы терминала от выполнения всех технологических операций. Суммарное количество технологических операций $T_1$, выполненных на всех видах смежного транспорта, будет равно $a_{11}x_{11} + a_{21}x_{21}$ и обойдется терминалу в сумму расходов равную $c_1(a_{11}x_{11} + a_{21}x_{21})$. Продолжив рассуждения, найдем и суммарный расходы терминала по отправлке всей партии прибывшего груза, отгружаемого на предоставленное количество подвижного состава:

$$L = c_1(a_{11}x_{11} + a_{21}x_{21}) + c_2(a_{12}x_{12} + a_{22}x_{22}) + \\ + c_3(a_{13}x_{13} + a_{23}x_{23})$$

или

$$L = \sum_{j=1}^{3} c_j \sum_{i=1}^{2} a_{ij}x_{ij}. \quad (5)$$

## Выводы

Представленную линейную функцию рассмотренных шести аргументов можно обратить к минимуму:

$$L \to \min.$$

В результате мы получили задачу линейного программирования: найти такие неотрицательные значения переменных $x_{11}$, $x_{12}$, …, $x_{23}$,

которые, во-первых, удовлетворяли бы ограничениям-неравенствам (2), (3); во-вторых, ограничениям-равенствам (4) и, наконец, обращали бы в минимум линейную функцию этих переменных (5).

**Библиографический список**

1. *Горев А. Э.* Основы теории транспортных систем: учеб. пособие. СПб.: СПбГАСУ. 2010. 214 с.

2. Shipping Statistics and Market Review. Vol. 56. N 5/6, ISL, Bremen, 2012.

3. *Витвицкий Е. Е.* Теория транспортных процессов и систем: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 207 с.

4. *Ларин О. Н.* Транзитный потенциал транспортных систем: учеб. пособие. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. 171 с.

5. *Швецов В. И.* Математическое моделирование транспортных потоков. 2003. № 11. С. 3–46.

**УДК 621.396.967; 621.396.969.14; 629.7.05 Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-79**

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

# АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ БЫСТРОГО РАСКРЫТИЯ СЛЕПЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА В БОРТОВЫХ ИМПУЛЬСНО-ДОППЛЕРОВСКИХ РАДАРАХ

*Предлагается подход к адаптации излучения бортового авиационного радара с высокой частотой повторения импульсов для повышения оперативности раскрытия «слепых дальностей» при обнаружении воздушного объекта на больших дистанциях. Стратегия и процедуры управления частотой повторения унифицированы для этапов обнаружения объекта и захвата его траектории. При обнаружении ситуация «объект не обнаружен, поскольку он в слепой зоне» рассматривается как инверсное неоднозначное наблюдение объекта. На основе адаптации частоты повторения импульсов такое виртуальное наблюдение гарантированно переводится в «реальное» обнаружение/измерение в «рабочей» зоне периода повторения, причем при минимизации требуемого количества пачек.*
***Ключевые слова:*** *высокая частота повторения импульсов, обнаружение, слепые дальности, импульсно-доплеровский радар, адаптация параметров излучения, минимизация затрат времени.*

***V. N. Kovregin****
*PhD Sc. Tech., Senior Researcher*
***G. M. Kovregina****
*PhD Sc. Tech.*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# AN ADAPTIVE APPROACH TO QUICKLY ELIMINATE BLIND RANGES WHEN DETECTING AN AIRBORNE OBJECT IN ONBOARD PULSE-DOPPLER RADARS

*An approach is proposed to adapt radiation of an airborne radar with a high pulse repetition rate to increase rate of blind ranges opening when a flying object is detected at large distances. Strategy and procedures for controlling pulse repetition rate are unified for stages of object detection and capture of its trajectory. When detected, situation «object was not detected, because it is in blind zone» is considered as an inverse ambiguous observation of object's state of affairs. Based on adaptation of pulse repetition rate, such a virtual observation is guaranteed to translate into real detection / measurement in working zone of pulse repetition period, while minimizing required number of bursts.*
***Keywords:*** *high pulse repetition rate, detection, blind range, pulse Doppler radar, adaptation of radiation parameters, minimization of time expenditures.*

## Введение

Для бортовых импульсно-доплеровских радаров с большой дальностью обнаружения воздушных объектов в режиме высокой частоты повторения импульсов (ВЧПИ) является актуальной проблема минимизации общей длительности излучения при решении задач обнаружения/измерения дальности до воздушного объекта. При широком диапазоне дальности на этапе обнаружения априорно существует большое число слепых зон из-за закрытия приемника до, во время и после излучения зондирующего импульса. На этапе измерения/оценивания дальности – априори высокий уровень неоднозначности первичных измерений по задержке эхосигнала объекта внутри периода повторения импульсов (ППИ).

Устранение слепых зон и неоднозначности измерений в современных радарах обычно осуществляется путем последовательного излучения серии из пачек зондирующих импульсов с различными значениями ППИ. Значения ППИ рассчитываются известными способами предварительно с учетом максимальной дальности обнаружения, ширины «слепой зоны» и других параметров излучения [1], [2]. Эти пачки обычно излучаются в программно-определяе-

мом последовательном шаблоне, сконфигурированном для задач «обнаружения/измерения». Для обеспечения большой дальности обнаружения, измерения траекторных параметров (захвата) и сопровождения объекта требуется: длительное когерентное накопление по каждой пачке; большое количество пачек в серии. Общая длительность радиоконтакта при использовании традиционных способов устранения слепых дальностей/неоднозначности при обнаружении/захвате для ряда практических приложений является неприемлемой. Ранее в [3], [4] представлена концепция и адаптивно-робастные методы обнаружения, захвата и сопровождения, которые, в частности, позволяют существенно уменьшить число пачек при захвате обнаруженного объекта. Однако устранение слепых дальностей при обнаружении все же базируется на традиционном [1], [2] программном переборе разных ППИ, рассчитанных заранее. Цель данной работы, в широком смысле – распространение технологии адаптации параметров излучения, используемой в процедурах захвата [3], [4], на этап обнаружения. Прагматическая цель – снижение затрат времени на устранение слепых дальностей и, прежде всего, для радаров с большим радиусом действия.

## Сущность подхода

В основе предлагаемого похода – разработка и применение «инверсного» варианта унифицированной технологии адаптивного управления периодами повторения импульсов $T_{ri}$, используемой [3] при захвате обнаруженного объекта, а также (в вырожденной форме) и при сопровождении. В базовой версии [3] процедуры захвата по дальности известны параметры пачки импульсов $P_{ti}$ ($i$=0), при которой был факт обнаружения объекта, а именно: ППИ $T_{r\ i}$, скважность $Q$; длительность импульса $\tau_{ppd}$; ирина слепой зоны с момента начала излучения импульса $T_{bz\ start} = \tau_{ppd} + t_{buf\ start}$; ширина слепой зоны непосредственно перед излучением следующего импульса $T_{bz\ end}$; дискрет дальности при обработке сигнала в прозрачной зоне ППИ $\Delta\tau_{ppd} = \tau_{ppd}/k_s$, где $k_s$ – положительное целое число, обычно в диапазоне от 1 до 4…5.

Кроме того, присутствует неоднозначное измерение параметра дальности (задержки эхо-сигнала относительно начала периода повторения) в виде положения дискрета дальности в прозрачной зоне ППИ. С учетом положения, ширины этого дискрета, длительности импульса, отношения сигнал/шум формируется оценка неоднозначной задержки $\tau_{ASDi}$ и соответствующая ей дисперсия ошибок $D_{\tau ASDi}$. После быстрого преобразования Фурье также доступно дискретное однозначное измерение доплеровской частоты (скорости сближения) объекта. С учетом номера, ширины доплеровского фильтра при известном количестве импульсов в пачке, длительности импульса и отношения сигнал/шум определяется точечная оценка доплеровской частоты $F_{Di}$/скорости $V_{Ri}$ при длине волны $\lambda$ и соответствующих дисперсий ошибок $D_{FDi}/D_{VRi}$. На рис. 1 представлена графическая интерпретация вышеуказанных параметров на основе данных регистрации «реального» сигнала в РЛС X-диапазона при обнаружении воздушного объекта при ВЧПИ.

Определение параметров адаптации ППИ для пачки $P_{t\ i}$ ($i\geq1$) осуществляется в минимаксном диапазоне прогнозных дальностей [$R_{\min\ i/i-1}$; $R_{\max\ i/i-1}$], которым соответствует диапазон индексов ППИ [$r_{\min i/i-1}$; $r_{\max i/i-1}$], где

$$R^*_{\max i/i-1} = R_{\max i-1} + \Delta R_{i/i-1};$$
$$R^*_{\min i/i-1} = R_{\min i-1} + \Delta R_{i/i-1};$$

$$r_{\max i/i-1} = int\ \{2R^*_{\max i/i-1}/c\ T_{r\ i-1}\};$$
$$r_{\min i/i-1} = int\ \{2R^*_{\min i/i-1}/c\ T_{r\ i-1}\};$$

$int\{.\}$ – процедура взятия целой части;

$$R_{\max i/i-1} = (c/2)\ [r_{\max i/i-1}\ T_{r\ i-1} + \tau_{\ i/i-1}];$$
$$R_{\min i/i-1} = (c/2)\ [r_{\min i/i-1}\ T_{r\ i-1} + \tau_{\ i/i-1}];$$

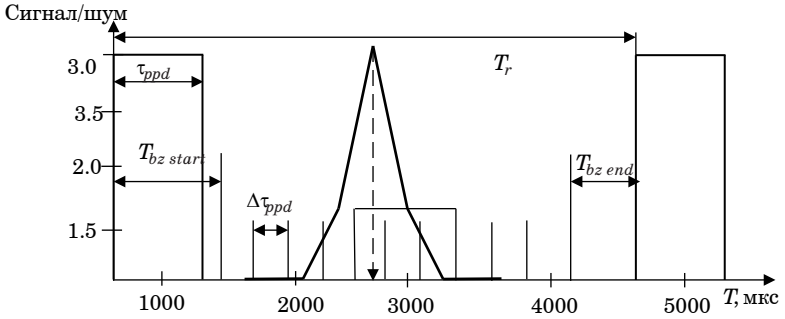



*Рис. 1. Первичные неоднозначные измерения дальности и доплеровской частоты (Гц)*

$R^*_{\min i-1}$, $R_{\max i-1}$ – минимальная и максимальная дальность объекта на момент излучения пачки $P_{ti-1}$; $c$ – скорость распространения радиоволны; $\Delta R_{i/i-1} = V_{Ri-1}\,\Delta t_{i/i-1}$ – прогноз перемещения объекта со скоростью $V_{Ri-1}$ за время $\Delta t_{i/i-1}$ между пачками $P_{t\,i-1}$ и $P_{t\,i}$.

Стратегии управления [3], [4] предполагают определение максимального модуля приращения ППИ $\Delta T_{ri/i-1} = T_{ri\,-}\,T_{ri-1}$, при котором прогнозируемые значения задержки сигнала $\tau^*_{\min i}$ и $\tau^*_{\max i}$ гарантированно наблюдаются в зоне $[T_{bz\,start};\ T_{ri\,-}\,T_{bz\,end}]$, где

$$\tau^*_{\min i} = \tau_{\,i/i-1} - \Delta r_{\,i/i-1}\,T_{ri-1} - r_{\min\,i/i-1}\,\Delta T_{ri/i-1}; \quad (1)$$

$$\tau^*_{\max I} = \tau_{\,i/i-1} - \Delta r_{\,i/i-1}\,T_{ri-1} - r_{\max\,i/i-1}\,\Delta T_{ri/i-1}; \quad (2)$$

$\Delta r_{\,i/i-1} = r_{\min\,i} - r_{\min i/i-1} = r_{\max i} - r_{\max i/i-1} = 0, 1, \ldots, N$ – задаваемые при поиске приращения индекса ППИ; $\tau_{\,i/i-1}$ – прогнозное значение неоднозначной задержки сигнала, полученное на основе предшествующего измерения/оценивания $\tau_{i-1}$ с учетом смещения $(2\Delta R_{i/i-1}/c)$.

Рассмотрим особенности этапа «обнаружение».

Предполагается, что излучена пачка с максимальным значением $T_{r\ i-1}$, объект присутствует в зондируемом пространстве, но не обнаружен, поскольку находится в слепой зоне. Также полагается, что при значении $T_{r\ i} = T_{r\ i-1}$ смещение $(2\Delta R_{i/i-1}/c)$ не обеспечивает выход из слепой зоны (рис. 2).

В предлагаемом подходе именно сама «слепая зона» понимается как виртуальное измерение пространственного состояния – инверсное неоднозначное наблюдение параметра дальности объекта. В качестве точечной оценки, например, можно рассматривать середину слепой зоны $T_{bz\ start}$ (см. рис. 1, 2) $\tau_{i-1} = 0.5\,(\tau_{ppd} + t_{buf\,start}) - T_{bz\,end}$. При гипотезе о равномерном законе распределения значения дисперсии $D_{\tau i-1}$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_{\tau i-1}$ ошибок определяются выражениями [5]

$$D_{\tau i-1} = (T_{bz\,start} + T_{bz\,end})^2/12 \text{ и } \sigma_{\tau i-1} = (D_{\tau i-1})^{1/2}.$$

Возможность прогноза $\tau_{i/i-1}$, $D_{\tau i/i-1}$ практически отсутствует, поскольку нет измерения скорости и, соответственно, возможности оценки перемещения $\Delta R_{i/i-1}$. В связи с этим берутся значения: $\tau_{i/i-1} \approx \tau_{i-1}$, $D_{\tau i/i-1} \approx D_{\tau i/i-1}$. Аналогично переназначаются дальности, индексы ППИ:

$$R^*_{\min\,i/i-1} \approx R_{\min\,i-1};\ R^*_{\max\,i/i-1} \approx R_{\max\,i-1};$$

$$r_{\min\,i/i-1} = int\,\{2R^*_{\min\,i/i-1}/c\,T_{r\,i-1}\},$$

$$r_{\max\,i/i-1} = int\,\{2R^*_{\max\,i/i-1}/cT_{r\,i-1}\}.$$

После этого для экстраполяции неоднозначной задержки сигнала (для минимальной и максимальной дальности) при вариации $T_r$ используются соотношения (1) и (2).

Для первой пачки сеанса обнаружения назначался: максимальный диапазон дальности обнаружения (от околонулевой до максимальной); наибольший ППИ из всех аппаратурно обеспечиваемых значений в конкретном радаре. Следовательно, для следующей пачки ищется отрицательное приращение ППИ, при котором $\tau^*_{\max\ i}$ максимально приближается к «правой» границе прозрачной зоны в ППИ, то есть к значению $(T_{r\,i} - T_{bz\,end})$. Для обеспечения нужной доверительной вероятности эта граница смещается «влево». В этом случае конец «рабочей» зоны в прозрачной зоне представляется в виде: $T^*_{end} = (T_{r\,i\,-}\,T_{bz\,end}) - k\,\sigma_{\tau i-1}$, где $k$ – коэффициент, назначаемый в зависимости от требуемой вероятности [5], например, на уровне 3 $\sigma_{\tau i-1}$. Тогда из выражения (2) при $\tau^*_{\max\ i} = T^*_{end}$ получается соотношение для адаптивного определения приращения $\Delta T_{r\,i/i-1}$ периода повторения:

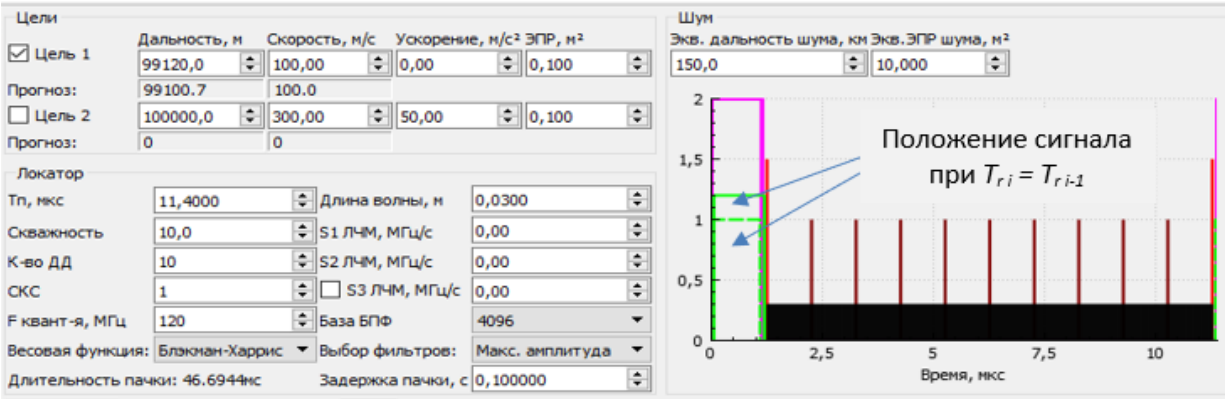



*Рис. 2. Параметры излучения, положения сигналов объекта при $T_{r\,i} = T_{r\,i-1}$ и при малом смещении за время между пачками, вид спектра во всех дискретах дальности*

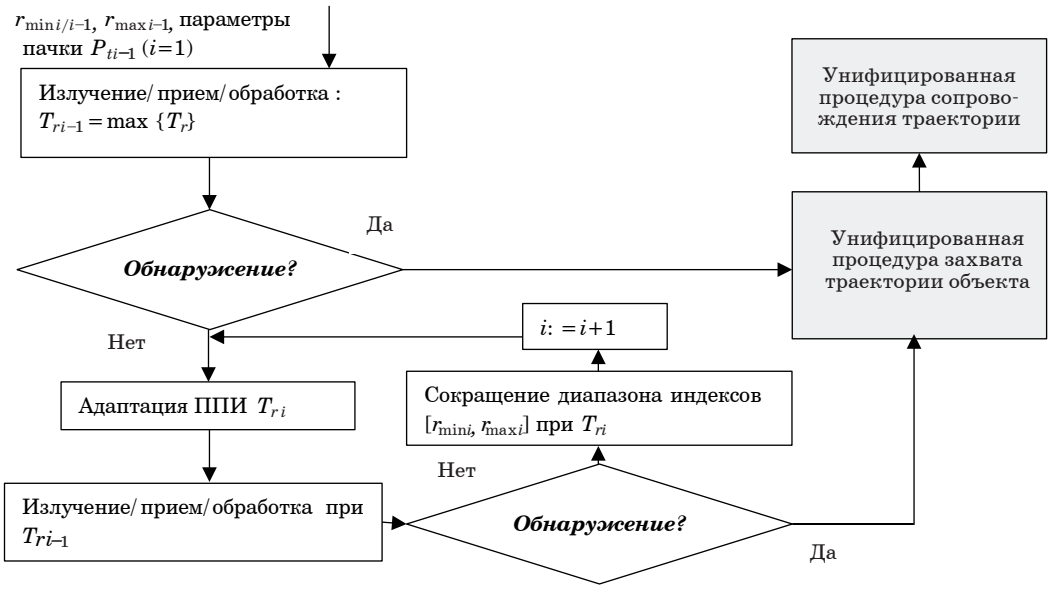



*Рис. 3. Структура циклического адаптивного раскрытия слепых дальностей при обнаружении объекта*

$$\Delta T_{r\,i/i-1} = (\tau_{i/i-1} - T^*_{end} - \Delta r_{i/i-1} T_{r\,i-1})/r_{\max i/i-1}. \quad (3)$$

Если же по второй пачке с приращением (3) обнаружение объекта также не состоялось, то обоснованными являются следующие выводы:

– объект находится в слепых зонах при периоде $T_{ri}$, причем в области относительно малых дальностей;

– диапазон индексов периода повторения для этих дальностей от $r_{\min\,i} = 0$ до индекса $r_{\max\,i} = int\ \{(T_{bz\,start} + T_{bz\,end})/\Delta T_{r\,i/i-1}\}$;

– при нулевом индексе слепая зона [0 м; $(c/2T_{bz\,start})$ ≈ (150…300) м] практически нераскрываемая при любых вариациях периода повторения, поэтому целесообразен $r_{\min i}$=1.

Для следующей пачки определение приращения ППИ выполняется аналогично предыдущей пачки – с использованием соотношения (3), но для значительно сокращенного диапазона индексов ППИ [1; $r_{\max i}$]. Упрощенная структура циклического адаптивного устранения слепых зон по дальности показана на рис. 3.

## Анализ подхода

В исходном диапазоне (от околонулевой до максимальной дальности обнаружения РЛС) приращение ППИ

$$\Delta T_r \approx (T^*_{end}/r_{\max\,det}),$$

где $r_{\max\,det}$ – индекс ППИ для максимальной дальности. Например, при $T_r$ =10 мкс для 150 км $r_{\max\,det}$ = 100. При $T^*_{end} \approx 9$ мкс получается приращение ППИ $\Delta T_r \approx 0{,}1$ мкс. Для значения $T_{bz\ start} \approx 1$ мкс наибольшая ненаблюдаемая дальность соответствует индексу 10 (≈ 15 км, 10% от всего диапазона). Тогда для следующей пачки допустимое приращение ППИ составит ≈ 0,9 мкс, то есть объект с высокой вероятностью может обнаруживаться даже при минимальном индексе ППИ. На следующем шаге допустимое приращение значительно увеличивается, что обеспечит уже гарантированную наблюдаемость объекта в рабочей зоне ППИ. В этом случае все слепые дальности считаются раскрытыми. Если обнаружение не состоялось, то принимается решение об отсутствии объекта в зондируемом пространстве.

Как показывает этот пример, адаптивный подход характеризуется высоким темпом сходимости, что также и подтвердилось результатами имитационного математического моделирования.

В моделируемых условиях для широкого диапазона дальностей (от 300 м до нескольких сотен км), когда традиционное раскрытие слепых дальностей требует не менее пачек импульсов [2], алгоритм, реализованный в рамках предложенного адаптивного подхода, требует не более 2–3 пачек.

## Заключение

В импульсно-доплеровских радарах при ВЧПИ для ускорения процесса раскрытия слепых зон при широком диапазоне дальностей обнаружения объекта целесообразен адаптивный подход к формированию параметров излуче-

ния. В предложенном подходе сам факт «отсутствие обнаружения» – это «инверсная» информация о пространственном состоянии объекта с неоднозначным «виртуальным измерением», менее точным и менее информативным в сравнении с «реальным», но позволяющем эффективно управлять «наблюдаемостью» путем адаптации периода повторения импульсов. При этом адаптация излучения, обработка сигналов/данных практически без изменения реализуется в унифицированной вычислительной процедуре устранения неоднозначности измерений при адаптивно-робастном захвате/сопровождении объекта.

**Библиографический список**

1. Справочник по радиолокации. Т. 3 / Под ред. М. Сколника, К. Трофимова, А. Винницкого. М.: Сов. радио, 1978. 528 с.

2. *Дудник П. И., Кондратенков Г. С., Татарский Б. Г.* Авиационные радиолокационные комплексы и системы. М., 2006.

3. *Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.* Методы интегрированной дальнометрии в задачах радиолокационного захвата и сопровождения воздушных целей // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника. Вып. 1. 2008. С. 61–68.

4. *Kovregin V., Kovregina G.* 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: 17.10.2021).

**УДК 656.7.025** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-84**

***А. С. Костин****
*ассистент*
***Ю. В. Шматко****
*студент*
***М. Е. Румянцев****
*студент*
**Санкт-Петербургский государственный университет авиакосмического приборостроения*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА СКЛАДЕ ДЛЯ ПОИСКА И ИДЕНТИФИКАЦИИ QR-КОДОВ И ЦВЕТНЫХ МЕТОК

*Современные системы навигации крайне актуальны, особенно в задачах складской логистики. В статье рассматривается необходимость решения складских задач и идентификация объектов на основе беспилотных авиационных систем, обосновывается необходимость формирования систем и методов выбора лучшего маршрута. Для решения данной задачи используется система навигации на основе Aruco-маркеров. На базе лаборатории беспилотных авиационных систем была реализована задача автономного пилотирования для распознавания объектов, размещенных в летном поле. Результаты моделирования данной задачи представлены в виде оконных форм реализации, как в среде симуляции Gazebo с разработкой программного кода на языке Python, так и в летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем. На основании выполненного полета подтверждается точность выполнения задания.*
***Ключевые слова:*** *беспилотная авиационная система, Aruco-маркеры, автономное управление, машинное зрение, распознавание объектов.*

***A. S. Kostin****
*Assistant*
***Y. V. Shmatko****
*Student*
***M. E. Rumyantsev****
*Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# SIMULATION OF OPERATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM IN A WAREHOUSE FOR SEARCH AND IDENTIFICATION OF QR CODES AND COLOR LABELS

*Modern navigation systems are extremely relevant, especially in the tasks of warehouse logistics. The article discusses the need to solve warehouse problems and identify objects based on unmanned aerial systems, justifies the need for the formation of systems and methods for choosing the best route. To solve this problem, a navigation system based on Aruco markers is used. On the basis of the laboratory of unmanned aircraft systems, the task of autonomous piloting was implemented to recognize objects located in the airfield. The simulation results of this task are presented in the form of window implementation forms, both in the Gazebo simulation environment with the development of program code in the Python language, and in the airfield of the unmanned aerial systems laboratory. Based on the flight performed, the accuracy of the task is confirmed.*
***Keywords:*** *unmanned aerial system, Aruco markers, autonomous control, machine vision, object recognition.*

## Введение

На текущий момент времени отрасль беспилотных авиационных систем активно развивается согласно прогнозу SKYMEC (ведущий дистрибьютор и интегратор беспилотных решений DJI в России и странах СНГ), ожидаемый объем рынка беспилотных авиационных систем вырастет до 42,8 млрд долларов к 2025 году [1]. Такой рост объясняется в первую очередь ростом объема инвестиций и укреплением рынка коммерческих дронов. Самой быстрорастущей сферой применения беспилотных авиационных систем является транспорт и складирова-

ние. С помощью беспилотников выстраивают логистические системы, доставляют грузы, проводят техническое обслуживание инфраструктуры. Прогноз Drone Industry Insights говорит, что к 2025 году транспортный сектор займет второе место по величине на рынке беспилотных авиационных систем [2]. Пандемия COVID-19 привела к взлету интернет-продаж и доставки товаров. На этом фоне появилась острая необходимость быстрой доставки товаров и организации автоматизации функционирования складов.

## Оборудование и полигон для исследования

Для реализации автономной работы беспилотной авиационной системы на складе, был разработан полигон на базе лаборатории беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП (далее – ЭБАС ГУАП). Квадрокоптерами, на которых проводилось исследование, являются квадрокоптеры «Клевер» компании ООО «Коптер экспресс» [4]. Данное оборудование установлено в выбранной лаборатории. Для проверки полета по выбранной траектории использовалось специальное учебное летное поле, входящее в состав лаборатории ЭБАС ГУАП. Основные квадрокоптеры компании COEX представляют собой группу квадрокоптеров как для учебных, так и промышленных задач [3]. Для реализации данной задачи применялась последняя модель учебного квадрокоптера называется «Клевер 4 Code» (рис. 1).

*Рис. 1. Строение «Клевер 4 Code»*

Главная особенность данной беспилотной авиационной системы – это модульная open source платформа. Открытая архитектура позволяет в полной мере получить навыки взаимодействия со сложной технической системой: сборка самого квадрокоптера, подбор необходимых компонентов, пайка, чтение технической документации, разработка полезной нагрузки, прикладное программирование на языках высокого уровня. Возможность адаптации дрона к различным задачам так же обусловлена открытой архитектурой и модульностью [5].

Таким образом, квадрокоптер является полностью ремонтопригодным и тонко настраиваемым под конкретные цели. Квадрокоптер поставляется в разобранном виде (40 видов деталей, не считая ремонтного комплекта). Все элементы располагаются на раме (состоит из деки монтажной, малой деки монтажной, деки захвата, четырех лучей, центральной пластины, малой монтажной пластины, четырьмя пластинами жесткости).

## Формулировка задачи исследования

Пусть перед складом стоит задача автоматизации процессов, например: ведение учета товаров, хранящихся на нем, с помощью беспилотной авиационной системы.

Решая эту задачу, нужно определиться с методами идентификации товара. Различают следующие виды маркировки товара: RFID-метка, штрих-код, DataMatrix-код, QR-код.

В качестве распознаваемого объекта выбран QR-код. Дополнительно, для повышения точности ориентирования дрона в пространстве, допускается использование цветных меток. Эти объекты будут распознаны машинным зрением с помощью камеры RPi Camera (G) (рис. 2), закрепленной на «Клевер 4 Code».

Камера совместима с мини-компьютером Raspberry Pi. Расположение камеры на квадрокоптере «регистрируется» в файле main_camera.launch с параметрами: направление обзора камеры (вниз/вверх) и направление шлейфа камеры (назад/вперед). Большой угол обзора обеспечивает объектив «рыбий глаз» (диагональный угол 160 градусов, горизонтальный угол 120 градусов) [7], [8]. Камера не имеет автофокусировки, поэтому перед полетом необходимо вручную отрегулировать фокус путем поворота объектива камеры по часовой стрелке или против. Разрешение камеры 1080p, сенсор 5 Мп, размер камеры 25×24 мм.

Важно учитывать, что корректность распознавания объектов напрямую зависит от осве-

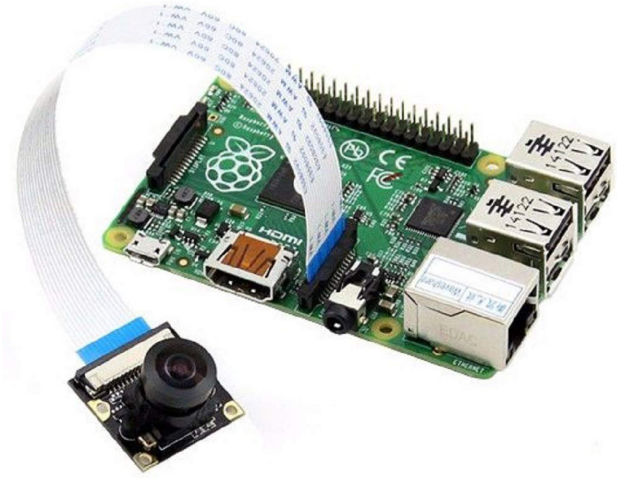


*Рис. 2. Камера RPi Camera (G)*

щенности помещения, возможны некорректные распознавания при плохом свете. Необходимо избавиться от солнечного света в помещении, так как он искажает цветопередачу.

Рассмотрим основные цветовые палитры, RGB и CMYK. RGB – аббревиатура английских слов red, green, blue – красный, зеленый, синий. Цветовой режим RGB использует эти базовые цвета для формирования любого другого цвета. Причина, по которой RGB является стандартным цветовым режимом заключается в том, что он предлагает самый широкий выбор цветов. Комбинируя основные цвета (красный, зеленый и синий) в разных количествах, можно добиться любого цвета с большой точностью.

CMYK работает совершенно по-другому, чем RGB, поскольку вместо использования «аддитивных» цветов, он фактически использует субтрактивные цвета (CMYK – аббревиатура английских слов Cyan, Magenta, Yellow, Key color). Key – черный.

Основное отличие заключается в следующем: при комбинации всех цветов цветового режима RGB в разных количествах, получается белый цвет (то есть наиболее чистая комбинация). В цветовом режиме CMYK все цвета являются вычитающимися, и поэтому, чем больше цветов вместе, тем темнее будет конечный цвет.

Камера RPi Camera (G), считывает цвета в RGB формате [5]. Для распознавания цветов машинным зрением обычно используют цветовую модель HSV. Такой подход обеспечивает возможность более удобной программной настройки диапазона цветов (при использовании HSV задается определенный цветовой спектр с коррекцией насыщенности и яркости).

В цветовой модели HSV координатами цвета являются H – цветовой тон, задается в градусах от 0 до 360 °, S – насыщенность, чем она выше, тем чище цвет и V – значение цвета, если этот параметр стремится к нулю, то цвет будет нейтрально серый. Насыщенность и значение цвета задается в процентах от 0 до 100 %. Эта модель позволяет менять цвет, оставаясь в заданных параметрах яркости или насыщенности. Либо поменять яркость, не затрагивая сам цвет. Также возможно поменять тон (цвет), оставаясь в определенных параметрах яркости и насыщенности [6].

Имеются несколько QR-кодов с заданными координатами (ячейки хранения товара), необходимо по короткому маршруту добраться до QR-кодов и считать информацию, которую они несут.

## Практическая реализация

При разработке решения будет использоваться симулятор Gazebo. Среда симуляции позволяет пользователям запускать и отлаживать программы автономного полета, используя большинство функций, доступных на реальном дроне, без риска повреждения оборудования. Такой подход позволяет оперативно вносить изменения в программный код, проверять его корректность и улучшать качество.

Под автономным управлением беспилотной авиационной системы подразумевается выполнение поставленной миссии без участия опера-

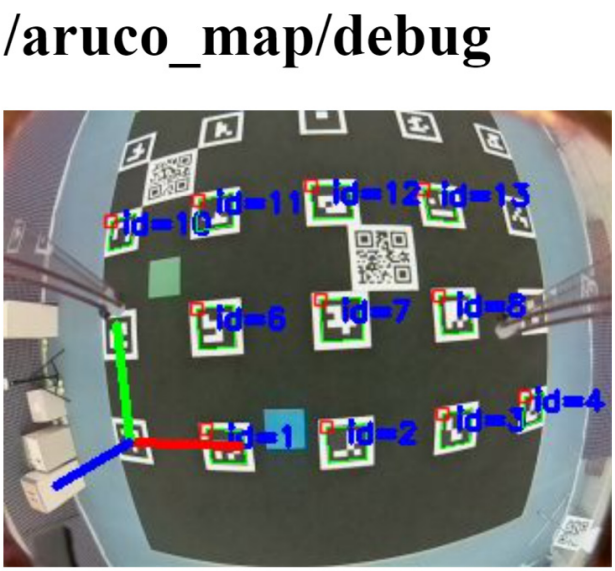



*Рис. 3. Пример распознавания aruco-маркеров реальным дроном в лаборатории беспилотных авиационных систем*

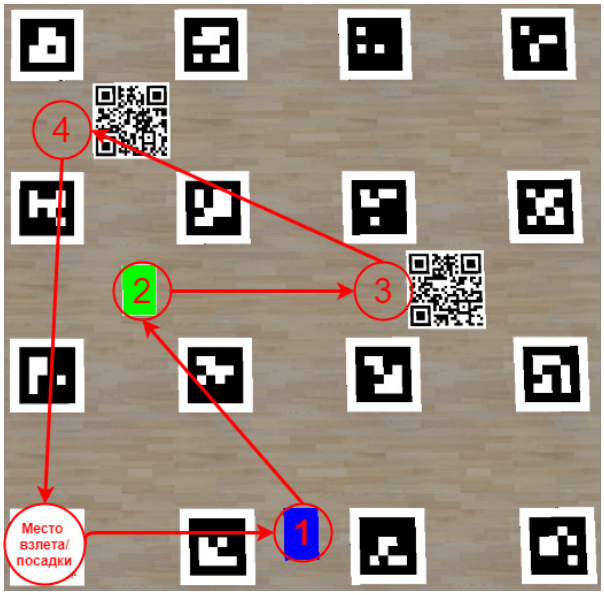



*Рис. 4. Граф полета*

тора (пилота). Навигация беспилотной авиационной системы базируется на технологии машинного зрения и поле Aruco-маркеров (рис. 3). Камера считывает изображение, находит на нам Aruco-маркеры, каждый из которых имеет свой уникальный идентификатор и, опираясь на эту информацию, беспилотная авиационная система позиционирует себя в пространстве [6].

Летное поле симулятора Gazebo представляет собой пространство 10×10 м. с размещенными aruco-маркерами и добавленными объектами с известными координатами для распознавания. На рис. 4 представлен граф полета. Согласно полетной миссии дрон должен считать первый цвет, затем второй, далее – два QR-кода.

В соответствии с полетным заданием разрабатывается программный код. Запуск программы автономного полета представлен на рис. 4.

Для выполнения поставленной задачи был написан код на языке программирования python, фрагмент которого представлен ниже:

```
def navigate_wait (x=0, y=0, z=1, yaw=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)
navigate (x=0, y=0, z=1, frame_id='body', auto_arm=True)
rospy.sleep (6)
navigate_wait (x=1.5, y=0.1)
color_check (rospy.wait_for_message ('main_camera/image_
raw', Image))
rospy.sleep (2)
```

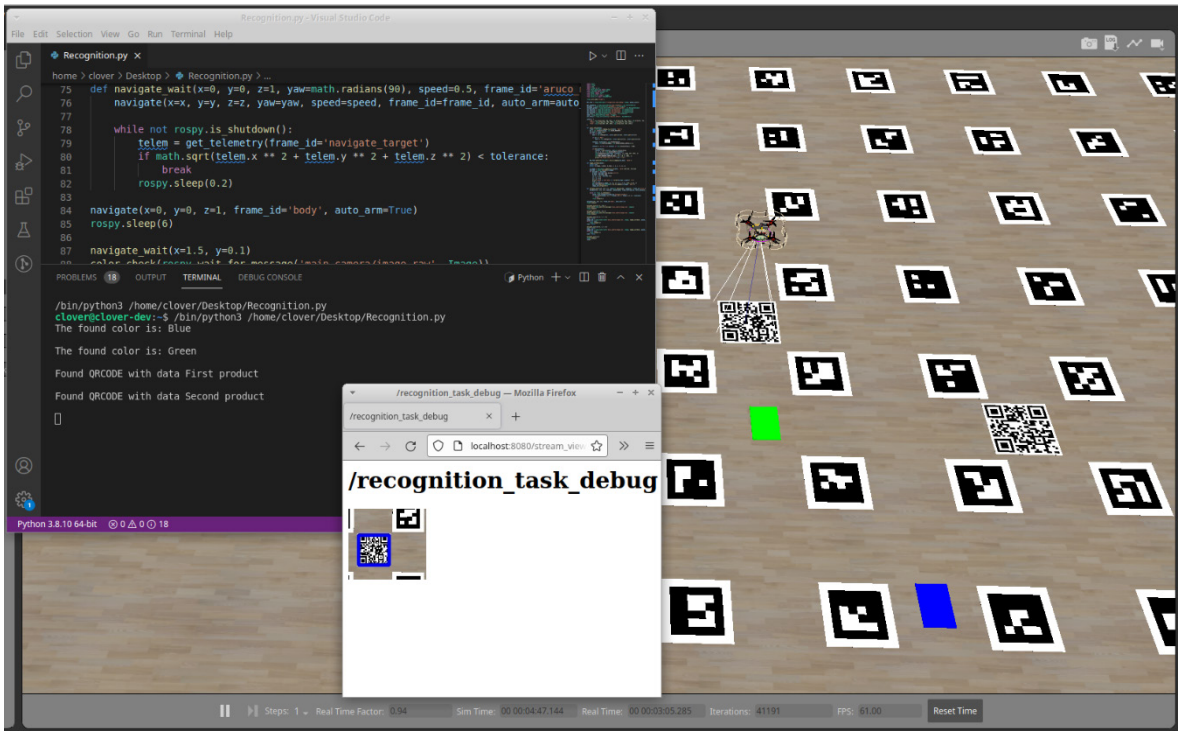



*Рис. 4. Оконная форма реализации в симуляторе Gazebo*

```
navigate_wait (x=0.5, y=1.5)
color_check (rospy.wait_for_message ('main_camera/image_
raw', Image))
rospy.sleep (2)
navigate_wait (x=2.4, y = 1.3)
scan = False
image_sub = rospy.Subscriber ('main_camera/image_raw',
Image, image_callback, queue_size=1)
while not scan:
rospy.sleep (0.1)
scan = False
navigate_wait (x=0.5, y = 2.5)
scan = False
image_sub = rospy.Subscriber ('main_camera/image_raw',
Image, image_callback, queue_size=1)
while not scan:
rospy.sleep (0.1)
scan = False
navigate_wait (z=1)
rospy.sleep (2)
land ()
```

*Рис. 5. Запуск дрона в лаборатории беспилотных авиационных систем*

После успешной симуляции полета беспилотной авиационной системы в Gazebo был произведен запуск программы автономного полета в лаборатории беспилотных летательных аппаратов (рис. 5). Корректное считывание цветовых меток и QR-кодов свидетельствует о правильности написанной программы автономного полета (рис. 6).

## Заключение

В рамках реализации программного обеспечения для выполнения инвентаризационных операций при помощи беспилотной авиационной системы мультироторного типа, удалось разработать программный код, при помощи которого были успешно выполнены задачи идентификации Qr-кодов, а также цветных меток. Данный программный код был отлажен в симуляционной среде и выполнен в лаборатории беспилотных авиационных систем на базе квадрокоптера «COEX Клевер 4». Данный метод может позволить ускорить процесс инвентаризации, оператору дрона достаточно указать область сканирования (указать координаты), а дрон автономного выполнит процесс поиска и идентификации объектов с сохранением идентифицированных объектов в отчете в виде текстового файла.

### Библиографический список

1. Рынок беспилотных летательных аппаратов 2020–2025: 5 ключевых особенностей // SKYMEC. URL: https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/5-osobennostey-rynka–2020–2025/ (дата обращения: 02.12.2021).

2. Infographic Drone Market in 2021–2026 // Drone Industry Insights. URL: https://droneii.com/project/

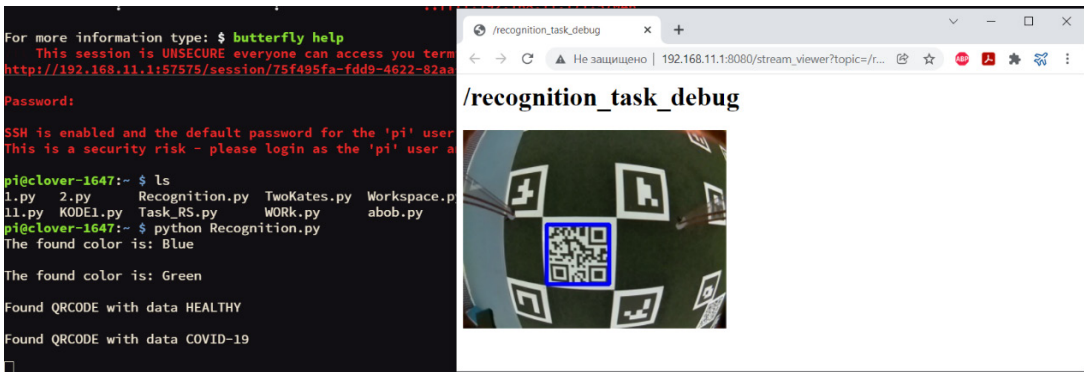



*Рис. 6. Демонстрация корректности выполнения поставленного задания*

drone-market-in–2021–2026 (дата обращения: 02.12.2021).

3. *Богатов Н. В., Костин А. С.* Управление и анализ полёта квадрокоптера при задании сложной траектории движения // Системный анализ и логистика. Вып. 4 (26), ISSN 2077–5687. СПб.: ГУАП, 2020. С. 3–12.

4. COEX – квадрокоптеры для образования и промышленности // COEX. URL: https://ru.coex.tech/ (дата обращения: 03.12.2021).

5. *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.

6. *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.

7. RPi Camera (G), Камера для Raspberry Pi // chipdip. URL: https://www.chipdip.ru/product/rpi-camera-g-waveshare (дата обращения: 04.12.2021).

8. Техническая документация // chipdip. URL: https://www.chipdip.ru/product/rpi-camera-g-waveshare (дата обращения: 05.12.2021).

**УДК 621.396.962.33; 621.396.969.181.4** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-90**

***А. С. Мурзаев****
*аспирант*
***В. Н. Коврегин****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ЗАДАЧА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ/ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ АППАРАТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ В РАДАРАХ С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

*Формулируется задача адаптивного управления параметрами излучения/приема/обработки квазинепрерывного сигнала с линейно-частотной модуляцией несущей волны при типовых аппаратных ограничениях в современных бортовых авиационных радарах при решении задач наблюдения/сопровождения воздушной цели. Описываются типовые ограничения РЛС, приводится методика решения задачи и демонстрация ее применения.*
***Ключевые слова:*** *адаптивное управление, ЛЧМ-сигнал, квазинепрерывное излучение.*

***A. S. Murzaev****
*PhD Student*
***V. N. Kovregin****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# THE PROBLEM OF ADAPTIVE CONTROL OF RADIATION/SIGNAL PROCESSING PARAMETERS UNDER HARDWARE CONSTRAINTS IN RADARS WITH QUASI-CONTINUOUS LFM-RADAR RADIATION

*The problem of adaptive control of radiation/reception/processing parameters of quasi-continuous signal with linear-frequency modulation of carrier wave under typical hardware limitations in modern airborne aviation radars when solving problems of surveillance/tracking of air targets is formulated. Typical radar limitations are described, a methodology for solving the problem and a demonstration of its application are given.*
***Keywords:*** *adaptive control, LFM signal, quasi-continuous signal.*

## Введение

Для обнаружения и измерения параметров воздушных целей (ВЦ), движущихся на встречных курсах, широко применяются импульсно-доплеровские системы, излучающие пачки импульсов с высокой частотой повторения (ВПЧ) и малой скважностью [1]–[3]. Режим ВЧП характеризуется большой дальностью обнаружения и диапазоном однозначного измерения скорости сближения. Однако главным недостатком такого режима является наличие «слепых» зон по дальности, связанных с бланкированием приемника на время излучения зондирующего импульса и неоднозначностью измеренной задержки сигнала от цели. Раскрытие «слепых» зон и разрешение неоднозначности производится различными методами [1]–[3], в том числе с применением сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) [4]–[7]. Повышение точности измерения дальности и скорости, прежде всего, связано с увеличением базы когерентного накопления сигнала, то есть увеличением числа импульсов в пачке и длительности периода повторения импульсов (ППИ) (увеличением времени радиоконтакта). Безграничное увеличение базы сигнала приводит к увеличению затрат на вычислительные ресурсы бортовой цифровой вычислительной машины и времени на обработку сигнала, а безграничное увеличение длительности периода повторения импульсов приводит к переходу из режима ВЧП в режим средней частоты повторения с потерей всех свойств режима ВЧП. Кроме того, увеличе-

ние времени радиоконтакта является нежелательным, так как приводит к уменьшению оперативности решения задач обнаружения, «захвата» и сопровождения, а также потере скрытности объекта-носителя.

Целью работы является формулировка условий задачи адаптивного управления параметрами излучения и обработки радиосигнала, а также представление методики решения задачи при сформулированных условиях.

## Постановка задачи

Рассматривается подход к адаптивному управлению выбора параметров излучения и обработки сигнала в типовой импульсно-доплеровской радиолокационной станции Х-диапазона, работающей в режиме с ВЧП с ЛЧМ квазинепрерывного сигнала. Зондирующий сигнал представлен последовательностью из ($n$–1) радиоимпульсов, где $n$ – база когерентного накопления.

В современных радарах при обработке принятого радиолокационного сигнала повсеместно применяются аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [8], которые производят дискретизацию сигнала, что вносит дополнительные погрешности.

Предварительно весь ППИ разбивается на $N$ отсчетов дальности с шириной в $\Delta\tau$.

При обработке сигнал внутри интервала $\Delta\tau$ суммируется, а затем по сформированным отсчетам дальности производится суммирование внутри скользящего окна размером $N_{\text{СКС}}$.

В связи с применением процедуры скользящего суммирования, ширина отсчета дальности формируется в соответствии с формулой:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{\text{имп}}}{N_{СКС}}, \qquad (1)$$

где $\tau_{\text{имп}}$ – длительность зондирующего импульса; $N_{СКС}$ – размер скользящего окна для суммирования.

Значение длительности импульса зависит от значения, указанного в техническом задании к аппаратуре излучения сигнала. А размер скользящего окна выбирается так, чтобы достичь наибольшей точности определения дальности. Дисперсия оценки неоднозначной задержки сигнала (НЗС) определяется по формуле [9]:

$$D_{\tau} = \frac{(\tau_{\text{имп}})^2}{\pi q} + \frac{\Delta\tau^2}{12} \to \min, \qquad (2)$$

$q$ – отношение сигнал/шум.

Первой подзадачей является подбор параметров излучения/обработки сигнала с целью минимизации погрешности определения НЗС. Очевидно, что увеличение окна скользящего суммирования приводит к повышению точности при дискретизации сигнала, однако с увеличением размера окна происходит и резкое увеличение затрат вычислительных ресурсов.

В соответствии с гипотезой о том, что измеренный сигнал в каждом отсчете дальности на каждой пачке описывается моделью [10]:

$$y_i = s_i + \xi_i,\ i = 0{,}1 \ldots n{-}1, \qquad (3)$$

где $y_i$ – измеренный сигнал; $s_i$ – полезный сигнал; $\xi_i$ – шумы измерений; $n$ – база когерентного накопления.

Вследствие предположения о сохранения уровня сигнала от периода к периоду и о гауссовском распределении помех и их некоррелированности, после когерентного накопления получается сигнал с отношением сигнал/шум ($q$) пропорциональный $n$. Таким образом, минимизации погрешности также можно достичь путем увеличения базы когерентного накопления сигнала.

На практике время бланкирования приемника не равно длительности зондирующего импульса, так как невозможно реализовать мгновенный набор и спадание мощности сигнала, поэтому к времени длительности импульса добавляется длительность переднего и заднего фронта, поэтому количество отсчетов дальности в рабочей зоне по ППИ вычисляется по формуле:

$$N_{\text{од}} = \text{int}\left(\frac{(T_{\text{п}} - t_{\text{пфи}} - (\tau_{\text{имп}} - t_{\text{зфи}}))}{\Delta\tau}\right), \qquad (4)$$

где $int$ () – процедура взятия целого числа; $T_{\text{п}}$ – ППИ; $t_{\text{пфи}}$ – длительность переднего фронта импульса (ПФИ); $t_{\text{зфи}}$ – длительность заднего фронта импульса (ЗФИ).

Тогда последнее наблюдаемое значение НЗС определяется по формуле:

$$\tau_{\max} = N_{\text{од}} \cdot \Delta\tau + \tau_{\text{имп}} + t_{\text{зфи}}. \qquad (5)$$

Все значения сигнала с НЗС более $\tau_{\max}$ отбрасываются, поэтому ширина «слепой» зоны по дальности определяется как:

$$\Delta\tau_{\text{СЗ}} = \tau_{\min} - (\tau_{\max} - T_{\text{п}}), \qquad (6)$$

где $\tau_{\min}$ – значение начальной НЗС, при которой возможно наблюдение ВЦ.

Осуществим переход от значения ширины «слепой» зоны в единицах времени к значению в единицах дальности:

$$\Delta R_{СЗ} = \frac{c}{2}\Delta\tau_{СЗ}, \qquad (7)$$

где $c$ – скорость распространения радиоволны в окружающей среде.

При фиксированном значении начальной НЗС ($\tau_{min}$) ширина «слепой» зоны будет зависеть от последней НЗС ($\tau_{max}$). В свою очередь при фиксированных значениях длительности импульса ($\tau_{имп}$), длительности ПФИ ($t_{пфи}$), длительности ЗФИ ($t_{зфи}$) и ширине отсчета дальности ($\Delta\tau$) последняя НЗС ($\tau_{max}$) будет полностью зависеть только от ППИ $T_п$.

В зависимости от ППИ возможны два случая, изображенные на рис. 1 и 2, когда число внутри процедуры *int* () в формуле 3 больше $N_{од}$ и $\tau_{max} < (T_п - t_{пфи})$, и, когда число внутри процедуры *int* () равно $N_{од}$ и $\tau_{max} = (T_п - t_{пфи})$. На рис. красной линией справа обозначена последнее наблюдаемое значение НЗС.

По рис. 1 и 2 наглядно видно, что ширина «слепой» зоны минимальна, когда число внутри процедуры int () равно $N_{од}$.

Таким образом, второй подзадачей является минимизация значения ширины «слепой» зоны $\Delta R_{СЗ} \rightarrow \min$, то есть подбора ППИ, при котором достигается минимальное значение.

Третьей подзадачей является минимизация погрешности определения доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоты.

Ширина доплеровского фильтра определяется по формуле:

$$\Delta f = \frac{1}{n * T_n}, \qquad (8)$$

Дисперсия определения доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоты определяется по формуле:

$$D_F = \frac{\Delta f^2}{12} + \frac{\Delta f^2}{q} \rightarrow \min, \qquad (9)$$

Формула (8) указывает на одновременное увеличение ППИ и базы когерентного накопления. Кроме того, в соответствии с описанным ранее, отношение сигнал/порог ($q$) также требу-

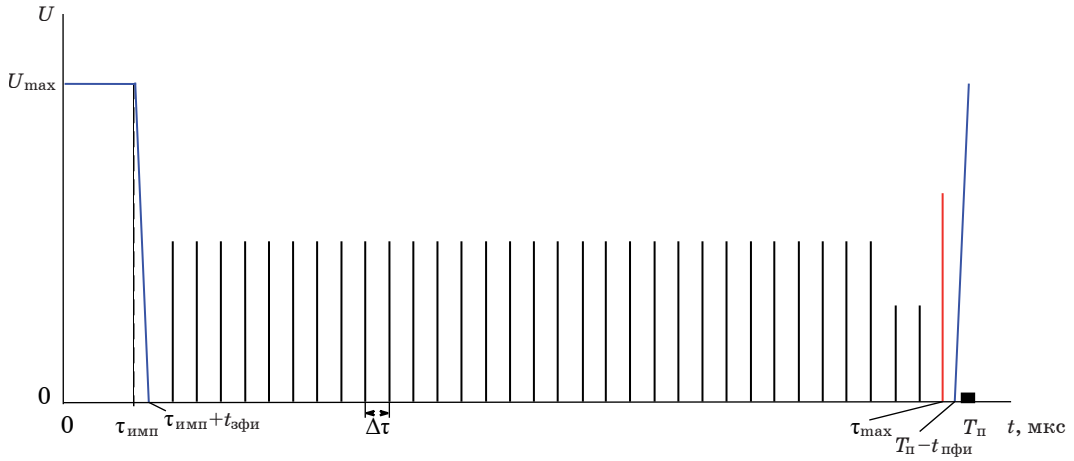



*Рис. 1. Разбиение периода повторения импульса на N отсчетов дальности с* $\tau_{max} < (T_п - t_{пфи})$

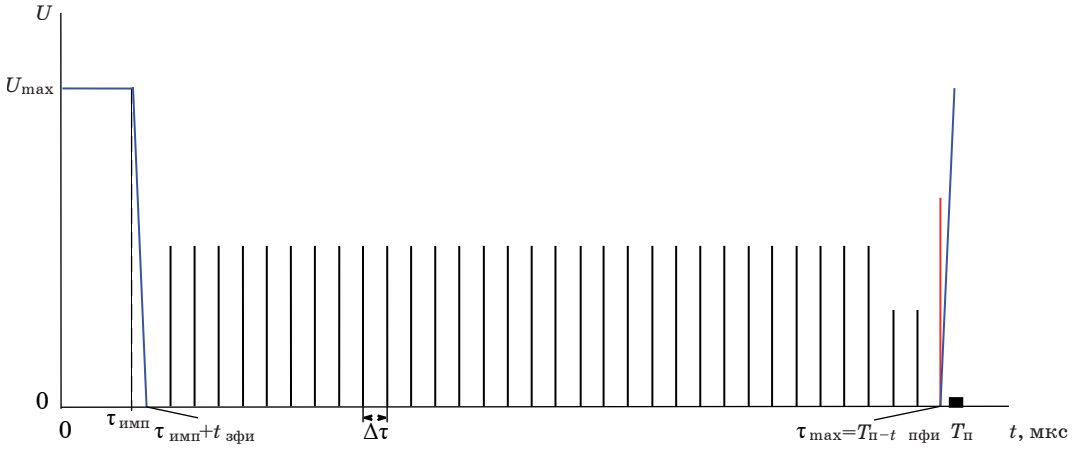



*Рис. 2. Разбиение периода повторения импульса на N отсчетов дальности с* $\tau_{max} = (T_п - t_{пфи})$

ет увеличения базы когерентного накопления для минимизации погрешности определения частоты.

При отсутствии какой-либо априорной информации о ВЦ выбор крутизны ЛЧМ для излучения сигнала должен быть наиболее максимальным, чтобы добиться наибольшего удаления от границ «слепой» зоне по частоте, вызванной мешающими отражениями боковых лепестков от земли. Но при излучении сигнала с ЛЧМ имеется такое аппаратное ограничение, как максимальная девиация частоты [11]. Девиация частоты определяется по формуле:

$$\Delta F = S \cdot t_{\text{рк}} = S \cdot (n-1) \cdot T_{\text{п}} < \Delta F_{\max}, \qquad (10)$$

где $t_{\text{рк}}$ – время радиоконтакта; $\Delta F_{\max}$ – значение максимальной девиации.

Тогда наблюдается противоречие: увеличение базы когерентного накопления и ППИ приводит к уменьшению возможной крутизны ЛЧМ, что в свою очередь негативно сказывается на обнаружении ВЦ, поскольку она может попасть в «слепую» зону по частоте. Сохранение максимальной крутизны ЛЧМ приводит к уменьшению базы при сохранении значения ППИ или уменьшению значения ППИ при сохранении базы, что приводит к ухудшению точности определения частоты.

При отсутствии ЛЧМ база когерентного накопления и ППИ ограничиваются аппаратными требованиями.

Таким образом, основной задачей является подбор квазиоптимальных параметров излучения и обработки сигнала на этапе обнаружения, которые обеспечивают минимальные значения погрешностей определения НЗС и доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоты, минимальной ширины «слепой» зоны по дальности и максимальном удалении от границ «слепой» зоны по частоте.

Набор всех требований и ограничений можно представить как:

$$D_{\tau} = \frac{(\tau_{\text{имп}})^2}{\pi q} + \frac{\Delta\tau^2}{12} \to \min,$$

$$\Delta R_{СЗ} = \frac{c}{2}(\tau_{\min} - (\tau_{\max} - T_n)) \to \min,$$

$$D_F = \frac{\Delta f^2}{12} + \frac{\Delta f^2}{q} \to \min,$$

$$q \to \max,\ N_{СКС} \to \max,\ S \to \max,$$

$$N_{СКС} \le N_{СКС\max},$$

$$T_{n\min} \le T_n \le T_{n\max},$$

$$S \cdot (n-1) \cdot T_n \le \Delta F_{\max},$$

$$n \le n_{\max},\ S_{\min} \le S \le S_{\max}.$$

Частным и упрощенным случаем является подбор квазиоптимальных параметров излучения и обработки сигнала на этапах «захвата» и автосопровождения, так как является известным ППИ и прогнозируемое значение доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоты. Тогда в этом случае требования сокращаются до:

$$D_{\tau} = \frac{(\tau_{\text{имп}})^2}{\pi q} + \frac{\Delta\tau^2}{12} \to \min,$$

$$D_F = \frac{\Delta f^2}{12} + \frac{\Delta f^2}{q} \to \min,$$

$$q \to \max,\ N_{СКС} \to \max,\ S \to \max,$$

$$N_{СКС} \le N_{СКС\max},$$

$$S \cdot (n-1) \cdot T_n \le \Delta F_{\max},$$

$$n \le n_{\max},\ S_{\min} \le S \le S_{\max}.$$

## Методика решения задачи

Предложим возможную методику разрешения поставленной задачи для этапа обнаружения для сигнала с ЛЧМ:

*Выбор размера скользящего окна.*

Размер скользящего окна не противоречит ни одному другому параметру, поэтому, исходя из ограничений по вычислительным возможностям, выбираем максимально возможное значение $N_{\text{СКС}} = N_{\text{СКС max}}$ и рассчитываем $\Delta\tau$ по формуле (1).

*Выбор ППИ.*

На рис. 3 представлена зависимость ширины «слепой» зоны по дальности для типовых параметров импульса импульсно-доплеровского радара, $\tau_{\text{имп}} = 0{,}6$ мкс, $t_{\text{пфи}} = t_{\text{зфи}} = 0{,}1$ мкс, максимальном значении размера скользящего окна 4 и минимальном значении НЗС $\tau_{\min} = 0{,}4$ мкс при значениях ППИ от 10 до 14 мкс.

Рис. 3 наглядно иллюстрирует, что минимальные значения не глобальны, а локальны. А также то, что локальные и глобальные минимумы проявляются через $\Delta\tau$ мкс.

Таким образом, можно задать следующий алгоритм выбора ППИ:

а) назначаются минимальное и максимальное значение периода $T_{\text{п min}}$ и $T_{\text{п max}}$, соответственно;

б) по формулам (4) и (5) для $T_{\text{п min}}$ рассчитывается количество отсчетов дальности $N_{\text{од0}}$ и максимальное значение НЗС $\tau_{\max}$, а также значение $\tau_{\max}$ с переносом в отрицательную область;

в) по формуле (4) для ($T_{\text{п min}} - 0.5*\Delta\tau$) рассчитывается количество отсчетов дальности $N_{\text{од1}}$;

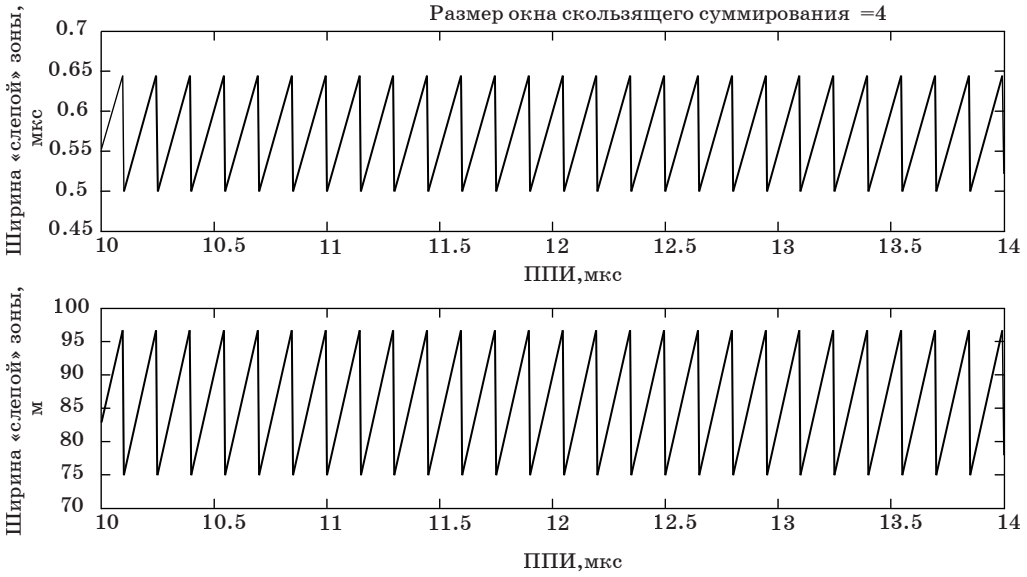



*Рис. 3. Зависимость ширины «слепой» зоны в мкс (а) и в метрах (б) от значения ППИ*

г) рассчитывается скорость нарастания $k = 1 - 2^* (N_{од0} - N_{од1})$; если $k < 0$, то по формуле (4) для $(T_{п\,min} + 0.5^*\Delta\tau)$ рассчитывается количество отсчетов дальности $N_{од1}$ и для нового значения скорость нарастания как $k = 1 + 2\times$ $\times(N_{од0} - N_{од1})$;

д) рассчитывается ближайшее значение с минимальным значением «ширины» слепой зоны как

$$T_{п0} = T_{п\,min} - \frac{(-t_{пфи} - \tau_{max})}{k};$$

если $T_{п\,0} < T_{п\,min}$, то $T_{п\,0} = T_{п\,0} + \Delta\tau$;

е) рассчитывается число количество ППИ с минимальным значением «слепой» зоны в заданном диапазоне ППИ

$$l = \text{round}\left(\frac{T_{п\,max} - T_{n0}}{\Delta\tau}\right),$$

где round () – операция по округлению к ближайшему целому;

ж) формируется массив из ППИ с минимальным значением «слепой» зоны;

3. *Выбор базы и крутизны ЛЧМ.*

Для каждого значения из массива ППИ, определенного ранее, и для каждого значения из массива значений крутизны ЛЧМ, исходя из значения максимальной девиации, рассчитывается максимальное значение базы и формируется массив:

$$k_б = \frac{\Delta F_{max}}{S_i T_{пj}} + 1,$$

$$k_б = floor\,(\log_2\,(k_б)),$$

где *floor* () – операция округления в меньшую сторону до ближайшего целого $na_{i,j} = 2k_б$; *na* – матрица из максимальных значений баз когерентного накопления.

При этом на основе матрицы максимальных значений баз когерентного накопления формируется матрицы значений ширины доплеровских фильтров ($\Delta f$).

Квазиоптимальные значения выбираются из соображения достижения максимального значения крутизны и максимального значения соотношения $S$ к $\Delta f$.

## Методика разрешения поставленной задачи для этапов захвата или автосопровождения для сигнала с ЛЧМ

Выбор параметров сигнала для излучения и обработки упрощен по сравнению с этапом обнаружения, так как ППИ рассчитывается в алгоритмах «захвата» и автосопровождения, выбор размера скользящего окна аналогичен рассмотренному выше. Задача сводится лишь к выбору базы когерентного накопления и крутизны ЛЧМ. На этапе захвата имеются данные о значении доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоты на предыдущей пачке импульсов, что позволяет сократить набор значений крутизны до некоторого диапазона. Например, при известных доплеровской (дальномерно-доплеровской) частоте и крутизне на предыдущей пачке можно спрогнозировать область

*Таблица 1*

**Матрица значений базы когерентного накопления**

| $S$, кГц/мс \ | $T_п$, мкс | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 12,05 | 12,2 | 12,35 | 12,5 | 12,65 | 12,8 | 12,95 | 13,1 | 13,25 | 13,4 |
| 2 | 32768 | 32768 | 32768 | 32768 | 32768 | 32768 | 32768 | 16384 | 16384 | 16384 |
| 4 | 16384 | 16384 | 16384 | 16384 | 16384 | 16384 | 16384 | 8192 | 8192 | 8192 |
| 6 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 |
| 8 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 8192 | 4096 | 4096 | 4096 |
| 10 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 |
| 14 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 |
| 16 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 4096 | 2048 | 2048 | 2048 |

*Таблица 2*

**Матрица значений ширины доплеровского фильтра**

| $S$, кГц/мс \ | $T_п$, мкс | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 12,05 | 12,2 | 12,35 | 12,5 | 12,65 | 12,8 | 12,95 | 13,1 | 13,25 | 13,4 |
| 2 | 2,533 | 2,501 | 2,471 | 2,441 | 2,412 | 2,384 | 2,357 | 4,659 | 4,606 | 4,555 |
| 4 | 5,065 | 5,003 | 4,942 | 4,883 | 4,825 | 4,768 | 4,713 | 9,318 | 9,213 | 9,110 |
| 6 | 10,130 | 10,006 | 9,884 | 9,766 | 9,650 | 9,537 | 9,426 | 9,318 | 9,213 | 9,110 |
| 8 | 10,130 | 10,006 | 9,884 | 9,766 | 9,650 | 9,537 | 9,426 | 18,637 | 18,426 | 18,219 |
| 10 | 20,261 | 20,012 | 19,768 | 19,531 | 19,300 | 19,073 | 18,853 | 18,637 | 18,426 | 18,219 |
| 14 | 20,261 | 20,012 | 19,768 | 19,531 | 19,300 | 19,073 | 18,853 | 18,637 | 18,426 | 18,219 |
| 16 | 20,261 | 20,012 | 19,768 | 19,531 | 19,300 | 19,073 | 18,853 | 37,273 | 36,851 | 36,439 |

частот при всех значениях крутизны МЛЧМ, и далее оценить, насколько далеко они находятся от границ «слепой» зоны по частоте.

## Моделирование предложенной методики

Положим, что $\tau_{имп} = 0{,}6$ мкс, $t_{пфи} = t_{зфи} = 0{,}1$ мкс, $N_{СКС\ max} = 4$, 12 мкс $\le T_п \le 13{,}5$ мкс, причем $T_п$ изменяется с шагом $\frac{1}{180}$ мкс, $n_{max} = 8192$, 2 кГц/мс $\le S \le 16$ кГц/мс, $S$ изменяется с шагом 2 кГц/мс, $\Delta F_{max} = 850$ кГц.

1) размер скользящего окна $N_{СКС} = 4$, а $\Delta\tau = 0{,}15$ мкс;

2) выбор ППИ:

– минимальное и максимальное значение периода 12 мкс и 13,5 мкс;

– количество отсчетов дальности для ППИ 12 мкс $N_{од0} = 74$, граница слепой зоны по дальности $\tau_{max} = -0{,}2$ мкс;

– количество отсчетов дальности для ППИ 11,925 мкс скорость нарастания $k = 1$;

– ближайшее значение с минимальным значением «ширины» слепой зоны $T_{п0} = 11{,}9$ мкс, так как оно менее 12 мкс, то выбираем следующее значение $T_{п0} = 12{,}05$ мкс;

– всего значений в заданном диапазоне $l = 10$;

– массив возможных ППИ: $T_п$ = [12,05; 12,2; 12,35; 12,5; 12,65; 12,8; 12,95; 13,1; 13,25; 13,4] мкс;

3) выбор базы крутизны ЛЧМ:

– представим в табл. 1 матрицу значений баз когерентного накопления;

– представим в табл. 2 матрицу значений ширины доплеровского фильтра;

При условиях максимизации параметров $S$, $n$ и $T_п$, и минимизации $\Delta f$ следует выбирать квазиоптимальное решение, такое решение находится при значении параметра $S = 16$ кГц/мс и значении ППИ 12,95 мкс.

## Заключение

Задача адаптивного управления параметрами является многокритериальной, при такой постановке задачи нельзя добиться безусловного оптимального решения, поэтому подбирается квазиоптимальное решение. В работе сформулированы критерии оптимизации и ограничения, накладываемые на параметры излучения/обработки сигнала. Предложена методика подбора квазиоптимальных параметров и продемонстрирован пример ее применения.

**Библиографический список**

1. Справочник по радиолокации. Т. 3 / Под ред. М. Сколника, К. Трофимова, А. Винницкого. М.: Сов. радио, 1978. 528 с.

2. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / П. И. Дудник, Г. С. Кондратенков, Б. Г. Татарский и др. М., 2006. 1112 с.

3. Радиолокационные измерители дальности и скорости. Т. 1 / В. И. Меркулов, А. И. Перов, В. Н. Саблин и др. М.: Радио и связь. 1999. 420 с.

4. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Методы интегрированной дальнометрии в задачах радиолокационного захвата и сопровождения воздушных целей // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Радиолокационная техника. Вып. 1. 2008. С.61–68.

5. *Kovregin V., Kovregina G.* 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: 10.12.2021).

6. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и линейной частотной модуляции. 58 2 692 912 1, заяв. 13.02.2018, опубл. 01.07.2019.

7. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Адаптивно-робастные методы радиолокационно-инерциального сопровождения воздушных объектов при мешающих отражениях квазинепрерывного ЛЧМ-излучения // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: сб. докладов, 2021. С. 26–32

8. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.

9. *Бартон Д., Вард Г.* Справочник по радиолокационным измерениям. М.: Сов. радио, 1976. 392 с.

10. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехниченских устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

11. *Ковригин В. Н., Ковригина Г. М.* Адаптация квазинепрерывных излучений авиационного радара при частотно-временной дальнометрии воздушного объекта // Сб. трудов XXVI Междунар. научно-технической конф. «Радиолокация, навигация, связь». 2020. Т. 3. С. 107–119.

**УДК 656.025.4** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-97**

***Я. И. Панкова****
*магистрант*
***С. В. Уголков****
*кандидат военных наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ КАТАЛИЗАТОРОВ ИЗ АНГАРСКА В БАКУ

*В статье рассматриваются вопросы организации перевозки катализаторов. Проводится детальный анализ специализированного подвижного состава и условий для перевозки катализаторов на морском, железнодорожном, воздушном и автомобильном транспорте. На основе сравнительного анализа коммерческих показателей перевозки определяется наиболее оптимальный вариант доставки.*
***Ключевые слова:*** *транспорт, перевозка катализаторов, специализированный подвижной состав, контейнеровоз, контейнер, тентовый полуприцеп, провозные платежи.*

***Y. I. Pankova****
*Postgraduate Student*
***S. V. Ugolkov****
*PhD of Military Sc., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# ORGANIZATION OF TRANSPORTATION OF CATALYSTS FROM ANGARSK TO BAKU

*The article discusses the issues of organizing the transportation of catalysts. A detailed analysis of specialized rolling stock and conditions for the transportation of catalysts by sea, rail, air and road is carried out. On the basis of a comparative analysis of the commercial indicators of transportation, the most optimal transportation option is determined.*
***Keywords:*** *transport, transportation of catalysts, specialized rolling stock, container ship, container, tent semitrailer, freight charges.*

## Введение

Процессы гидропереработки нефтяных фракций, которые включают в себя процессы гидроочистки и гидрокрекинга, являются более масштабными процессами нефтепереработки и имеют ключевое значение для производства моторных топлив, соответствующих требованиям современных экологических стандартов. Почти 90 % химических процессов требуют использования катализаторов. Для протекания различных реакций требуются соответствующие катализаторы. На рынке существуют тысячи наименований марок этого продукта. К таким процессам относятся и процессы нефтепереработки, на долю которых приходится 30–40 % от всех применяемых в России катализаторов.

Производство современных нефтепродуктов невозможно без катализаторов, так как они обеспечивают эффективность переработки и экологические характеристики топлива. Ключевыми для отечественной отрасли являются катализаторы каталитического крекинга, гидрокрекинга и гидроочистки.

На территории Российской Федерации работают восемь производителей катализаторов. Одним из них является АО «Ангарский завод катализаторов и органического синтеза». Именно этот завод является одним из главных поставщиков для крупнейшего нефтеперерабатывающего предприятия Южно-Кавказского региона – Бакинского нефтеперерабатывающего завода имени Гейдара Алиева, так как его катализаторы являются более предпочтительными по технико-экономическим показателям [1].

## Определение тары и транспортных средств

На дальние расстояния катализаторы перевозят морским, воздушным, а также железнодорожным и автомобильным транспортом.

В статье рассматривается организация перевозки катализаторов из города Ангарск в Баку

*Таблица 1*

**Технические характеристики 40-футового контейнера**

| Параметр | Показатель |
|---|---|
| Внешние размеры (длина, ширина, высота), м | 12192/2438/2896 |
| Внутренние размеры (длина, ширина, высота), м | 12039/2350/2684 |
| Размеры дверного проема (ширина, высота), м | 2340/2597 |
| Объем, м$^3$ | 76 |
| Вес, кг | 4000 |
| Максимальная грузоподъемность, кг | 26500 |

прямым железнодорожным маршрутом, а также двумя маршрутами смешанной перевозки посредством четырех видов транспорта (железнодорожный транспорт, морской транспорт, автомобильный транспорт, воздушный транспорт).

Для минимизации временных и материальных затрат на осуществление погрузочно-выгрузочных работ в качестве укрупненной грузовой единицы выбран 40-футовый универсальный контейнер (табл. 1, рис. 1) [2].

Перевозка контейнеров на морском транспорте будет осуществляться с помощью сухогрузного судна типа «Нева-Лидер 1» класса «Волго-Дон макс», представленный на рис. 2 [3].

*Рис. 1. 40-футовый контейнер*

Для перевозки катализаторов в контейнерах по железной дороге выбрана фитинговая платформа модели 13–3103-01 [4]. Внутренняя длина контейнера составляет 12032 мм, внутренняя ширина 2350 мм, внутренняя высота 2393 мм, грузовместимость от 24800 до 26840 кг. На данной платформе можно разместить два 40-футовых контейнера, в котором 50 транспортных пакетов. Масса груза в контейнере будет составлять 24 т, а с паллетами 24,25 т. Грузоподъемность контейнера составляет 28,8 т (рис. 3). Для транспортировки катализаторов понадобится пять контейнеров.

Также при перевозке железнодорожным транспортом четырехосный крытый вагон типа 11–217, грузоподъемностью 67,9 т и с внутренними размерами 13580×2780×2790 мм (рис. 4).

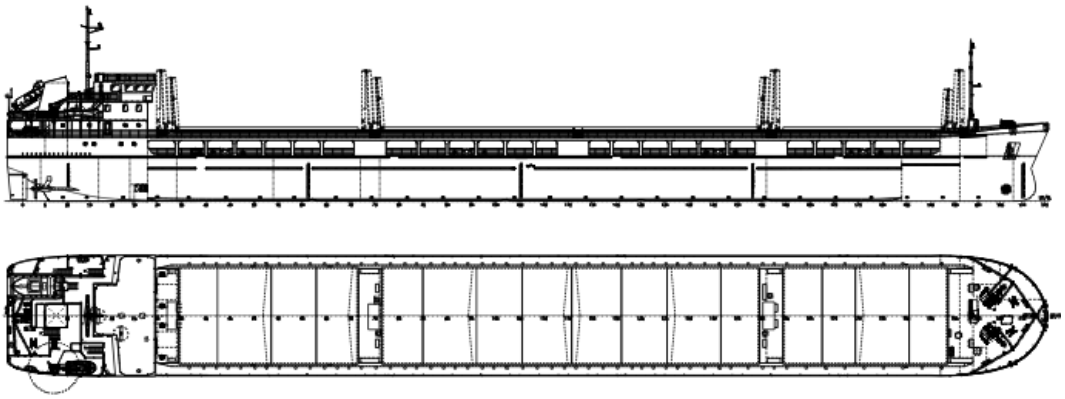


*Рис. 2. Схема судна типа «Нева-Лидер 1»*

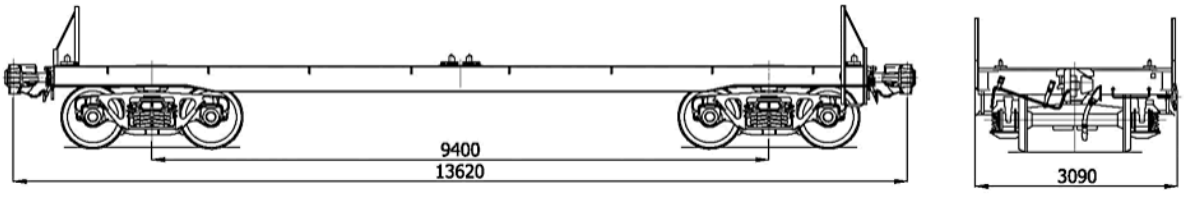



*Рис. 3. Четырехосная платформа для перевозки крупнотоннажных контейнеров, модель 13–3103–1*

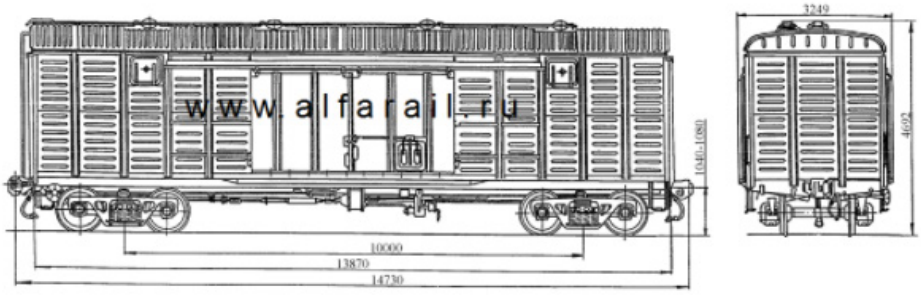



*Рис. 4. Четырехосный крытый вагон типа 11–217*

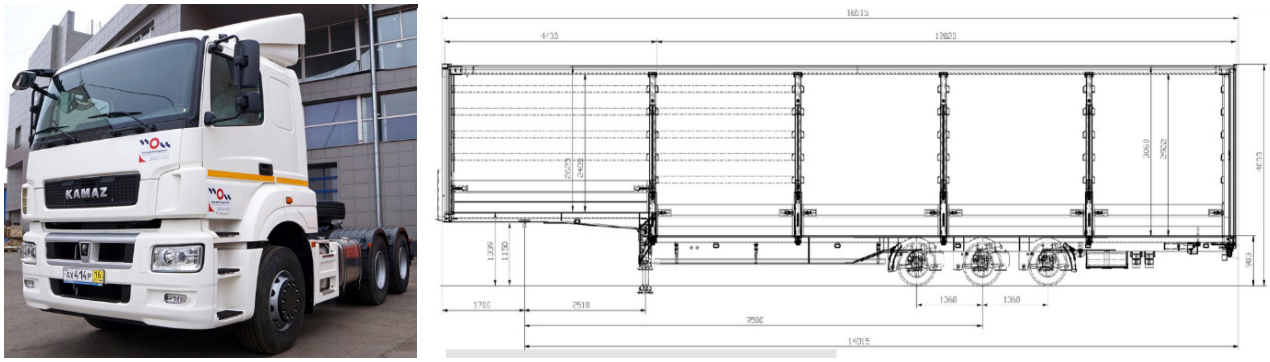



*Рис. 5. Тягач КАМАЗ 65206 и тентовый полуприцеп Meusburger Новтрак модель ТР–345*

Автотранспортом катализаторы перевозят в тентовом полуприцепе Meusburger Новтрак модель ТР–345 грузоподъемностью 35 т с тягачом КАМАЗ 65206 (рис. 5) [5].

При перевозке воздушным транспортом выбран самолет Boeing 747, грузоподъемность 120 т и с объемом грузового отсека 600 м$^3$.

## Требования к таре и маркировке

Одним из важных требований к транспортировке груза железнодорожным транспортом является правильная маркировка. На поверхность должен быть нанесет специальный маркировочный номер, где указаны: максимальная масса брутто, внутренний объем, вес упакованной тары. Вся тара должна проходить проверку и для этого возникает необходимость снабжения контейнеров специальной табличкой, в которой указано, что при осмотре претензий не возникло (рис. 6).

При транспортировке контейнеров на открытой платформе важно чтобы прицеп подходил по следующим требованиям: достаточная опорная рама по длине и ширине, наличие креплений, возможность дополнительной фиксации контейнера. Фиксация выполняется такими средствами как: 1) фитинги и болты, 2) цепи, 3) боковые упоры [6].

1. В зависимости от размеров тары фитинги и болты могут размещаться и по бокам, и по всей длине. При установке крепления должны быть прочно закручены.

2. Цепи протягиваются под опорой и сматываются на плите. Такой вид крепления используется при любых тоннажностях.

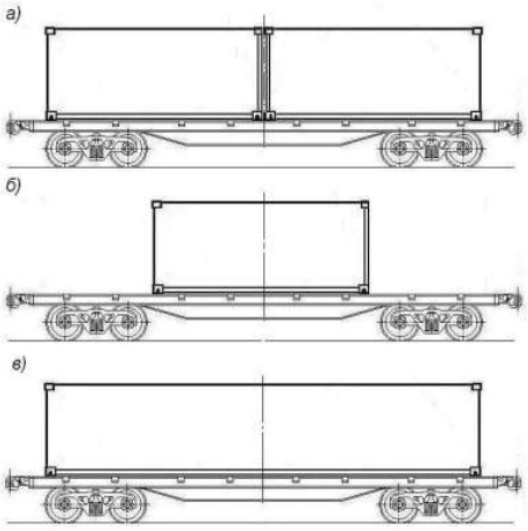



*Рис. 6. Схемы размещения крупнотоннажных контейнеров на платформе, оборудованной упорами для закрепления контейнеров*

*Рис. 7. Схема маршрутов перевозки*

3. Если на платформе не предусмотрен борт или его нельзя поднять из-за особенности конструкции, то в таком случае монтируются дополнительные деревянные или стальные блоки.

Также необходимо соблюдать дополнительные требования по перевозке тары: контейнер должен быть исправным (проверяется достаточно ли хорошо открываются двери и появление риска открывания их при перевозке); груз хорошо закреплен внутри (для этого используются такие приспособления как стропы, ремни, тросы и др.); содержимое контейнера равномерно распределено (не допускать, чтобы на отдельные оси оказывалась более сильная нагрузка, чем на других).

На сами бочки с катализаторами гидроочистки наносятся манипуляционные знаки, такие как: «Осторожно: хрупкое», «Герметичная упаковка», «Верх, не кантовать» [6].

## Маршруты перевозки и используемые виды транспорта

Для определения оптимального маршрута и вида транспорта перевозки катализаторов необходимо произвести сравнительный анализ характеристик коммерческих показателей реально существующего трафика.

Определение маршрута является важнейшей частью, так как от этого зависит стоимость, скорость доставки и безопасность перевозимого груза. Варианты маршрутов представлены на рис. 7.

Маршрут № 1: Автомобильный транспорт: Ангарск – Иркутск; воздушный транспорт: аэропорт Иркутск – аэропорт Гейдар Алиев; автомобильный транспорт: аэропорт Гейдар Алиев – ПО «Азерихимия» в Сумгаите. Для данного маршрута выбраны следующие виды транспорта: тягач (КАМАЗ 65206) с тентовым полуприцепом (Jumbo 16500, модель TP–345) и самолет Boeing 747.

Маршрут № 2: Железнодорожным транспортом крытыми вагонами Ангарск – Красноярск – Новосибирск – Омск – Исилькуль RZD. Расстояние 2146 км. Движение по Казахстану: Балаево – Петропавловск – Кустанай – Кандагач – Мокат – Ганюшкино. KZH 1933 км. Рзд. № 1: Астрахань – Самур RZD 793 км. Движение по Азербайджану: Ялама – Сумгаит AZ 171 км.

Маршрут № 3: Железнодорожный транспорт: Ангарск – Туркменбаши; морской транспорт: Туркменбаши – Баку; автомобильный транспорт: Баку – ПО «Азерхимия».

*Таблица 2*

**Сравнительная таблица времени и стоимости перевозок [11]**

| Маршрут №1 | | | Маршрут №2 | | | Маршрут №3 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Вид транспорта | Стоимость, руб | Время | Вид транспорта | Стоимость, руб | Время | Вид транспорта | Стоимость, руб | Время |
| Автомобильный | 109500 | 7 ч | Железнодорожный (RZD) | 662997,9 | 3 с. 22 ч | Железнодорожный | 4483532,8 | 15 с. 3ч |
| Воздушный | 9398500 | 17 ч | Железнодорожный (KZH) | 1473653,2 | 3 с. 7 ч | Морской | 709048,7 | 1 с. 14ч |
| Автомобильный | 105517 | 5 ч | Железнодорожный (RZD) | 313095,2 | 1 с. 10 ч | Автомобильный | 90862 | 5 ч |
| | | | Железнодорожный (AZ) | 246563,2 | 13 ч | | | |
| ИТОГО | 9613517 | 1 с. 5 ч | | 2696309,4 | 9 с. 4 ч | | 5192672,4 | 16 с. 22 ч |

Маршрут № 1а: Автомобильный транспорт: Ангарск – Иркутск

Расчет состоит из: платы за перевозку 1 т груза; платы за 1 км пробега автомобиля, грузоподъемностью 35 т веса перевозимого груза.

## Определение провозных платежей на маршрутах перевозки

С помощью электронного калькулятора [7] определяем плату за перевозку 1 т груза. Затем определяется плата за 1 км пробега автомобиля. Исходя из этих данных стоимость перевозки одного тентового полуприцепа равняется 21 900 руб. так как требуется 5 полуприцепов стоимость обойдется в 109500 руб.

Маршрут № 1б воздушный транспорт: аэропорт Иркутск – аэропорт Гейдар Алиев.

Расчет стоимости авиаперевозки зависит от:

– тарифа авиаперевозки, руб./кг;

– массы перевозимого груза, кг;

– затрат на погрузо-разгрузочные работы в аэропорту прибытия и отправления, руб;

– затрат на оформление документов, руб.

Тарифы на грузовые авиаперевозки варьируются от 1 до 8$ за кг. Так как перевозится большой объем партии используется низкий тариф. На данный момент курс 1$ равен 75 руб. Следовательно, стоимость авиаперевозки составит 9398500 руб.

Маршрут № 1в автомобильный транспорт: аэропорт Гейдар Алиев – ПО «Азерихимия» в Сумгаите.

Расчет стоимости перевозки автомобильным транспортом производится аналогично маршруту 1а [7]. Значит, стоимость перевозки обойдется в 105517 руб.

Маршрут № 2: Так как маршрут проложен по железным дорогам 3 стран расчет стоимости перевозки железнодорожным транспортом определяется по прейскуранту № 10-01 и ЕТТ [8], [9]. Общая провозная плата для 3 вагонов по дорогам РФ составляет 976 092 руб, общая провозная плата по железным дорогам Казахстана и Азербайджана составляет 1 720 216. Тогда общая стоимость перевозки по маршруту № 2 Ангарск – Сумгаит составит 2 696 309 руб. общее время по маршруту составляет 9 суток 4 часа.

Маршрут № 3: Сумма провозного платежа по железной дороге г. Ангарск – Туркменбаши определяется по прейскуранту №10-01 и ЕТТ [8], [9] и составляет 4483532 руб.

Расчет провозных платежей за перевозку пяти 40 футовых контейнеров морским транспортом порт Туркменбаши – порт Баку зависит от [10], [11]:

– ставки фрахта за перевозку;

– количества контейнеров;

– стоимости стоянки судна в порту;

– общего времени на погрузку и выгрузку;

– стоимости хода судна в сутки;

– времени хода судна;

– веса груза брутто к дедвейту;

– стоимости погрузочно-выгрузочных работ;

– стоимости оформления документации в порту (назначения и отправления);

– количества портов;

– топливной надбавки за тонну груза брутто;

– валютной надбавки.

Провозная плата по морю составит 709 048 руб.

Расчет стоимости перевозки катализаторов автомобильным транспортом состоит из: платы за перевозку 1 т груза; платы за 1 км пробега автомобиля, грузоподъемностью 35 т; веса перевозимого груза аналогично маршруту 1а и 1в [7], стоимость перевозки составит 90862 руб.

## Анализ показателей перевозки на маршрутах

Исходя из расчетов, произведенных по каждому маршруту можно сделать вывод о том, что самым быстрым способом транспортировки является первый маршрут (автомобильный транспорт: Ангарск – Иркутск; воздушный транспорт: аэропорт Иркутск – аэропорт Гейдар Алиев; автомобильный транспорт: аэропорт Гейдар Алиев – ПО «Азерихимия» в Сумгаите) за счет использования на данном маршруте самолета, что в разы снижает время доставки. Но данный маршрут является экономически нецелесообразным из-за дороговизны использования воздушных судов.

Так как груз не является скоропортящимся, то время доставки не столь важно. Значит можно сделать вывод о том, что самым экономически выгодным и приемлемым по времени доставки является маршрут № 2, проходящий через железные дороги Российской Федерации, Казахстана и Азербайджана.

## Заключение

В статье представлены сведения об упаковке, способе пакетирования катализаторов. Также обоснован подвижной состав на автомобильном, воздушном, морском и железнодорожном транспорте. Представлены подробные маршруты для всех видов транспорта.

На первом маршруте смешанная перевозка катализаторов осуществлялась с помощью тентовых полуприцепов и самолета. Стоимость перевозки составила 9 613 517 руб., время – 1 сутки 5 часов.

На втором маршруте перевозка осуществлялась с использованием крытого вагона из Ангарска до Сумгаита. Стоимость перевозки составила 2 696 309,38 руб., время в пути – 9 суток 4 часа.

На третьем маршруте смешанная перевозка осуществлялась в 40-футовых контейнерах: на железнодорожном транспорте использовалась четырехосная платформа модели 13–3103-01, на морском транспорте на сухогрузном судне «Нева-Лидер 1» и на автомобильном транспорте. Стоимость перевозки составила 5 192 672,4 руб., а время в пути – 16 суток 22 часа.

Таким образом, с учетом полученных расчетами данных можно сделать вывод о том, что экономичная и относительно быстрая перевозка будет осуществляться на маршруте № 2 железнодорожным транспортом.

### Библиографический список

1. Основные каталитические процессы в нефтепереработке. URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/pererabotka/545460-katalizatory-v-neftepererabotke/ (дата обращения: 17.11.2021).

2. ГОСТ Р 53350-2009. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса. М.: Стандартинформ, 2018. 54 с.

3. База данных для морских перевозок. URL: https://www.marinetraffic.com/ (дата обращения: 18.11.2021).

4. Вагон.by. Сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. URL: https://yandex.ru/search/?text=vagon.by&lr=98546&clid=9403&src=suggest_B (дата обращения: 18.11.21).

5. Низкорамный полуприцеп «Meusburger Новтрак ТР 345». URL: https://reis.zr.ru/article/spetstehnika/traly/nizkoramnyj_polupricep_meusburger_novtrak_tp_345/ (дата обращения: 23.11.2021).

6. ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов. М.: Стандартинформ, 2011. 87 с.

7. Расчет тонно-километров онлайн калькулятор. URL: https://www.center-pss.ru/math/tonno-kilometri.htm (дата обращения: 24.11.2021).

8. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Ч. 1, 2. М., 2003 (с изменениями на 31 января 2017 года).

9. Единый транзитный тариф. ЕТТ. Комитет ОСЖД. Варшава. Действует с 01.07.91 (с изменениями и дополнениями на 08.09.2020). 108 с.

10. Международный фрахтовый брокер-сервисы для транспортных компаний, ставки фрахта, трекинг контейнеров, контейнерные перевозки. URL: https://www.searates.com (дата обращения: 25.11.2021).

11. *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.

**УДК 656.073.7** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-103**

***В. В. Рубинов****
*аспирант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА УРОВНЕ МАРШРУТОВ

*Во всем мире ежеминутно производится огромное количество отходов. Вопросы организации эффективной системы работы с отходами, являются очень актуальными. От правильно организованной системы накопления, транспортировки, обработки или утилизации зависит экономическая эффективность и затраты пользователей системы. В статье рассмотрен процесс работы с отходами в городах России. Описаны техника и методы работы с отходами в крупных городах на первой ступени вывоза. Сформулирована задача оптимизации территориальной схемы вывоза твердых коммунальных отходов. Описан и рассмотрен технологический процесс работы мусоровоза первого плеча на маршруте. Сформулированы критерии и факторы, влияющие на выбор оптимального маршрута. Описаны необходимые исходные данные для расчета оптимальной схемы тяготения отходов. Построена функция совокупных издержек на маршруте.*
***Ключевые слова:*** *твердые коммунальные отходы, мусор, система обращения отходов в Санкт-Петербурге, транспортное предприятие, переработка, транспортная задача.*

***V. V. Rubinov****
*PhD Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# DEVELOPMENT OF A MODEL FOR OPTIMIZING MUNICIPAL SOLID WASTE STREAMS AT THE ROUTE LEVEL

*All over the world, a huge amount of waste is generated every minute. The organization of an effective waste management system is very topical. The economic efficiency and costs of the users of the system depend on a properly organized system of accumulation, transportation, processing or disposal. The article discusses the process of working with waste in the cities of Russia. The technique and methods of working with waste in large cities at the first stage of removal are described. The problem of optimization of the territorial scheme for the disposal of solid municipal waste has been formulated. The technological process of operation of the first leg garbage truck on the route is described and considered. The criteria and factors influencing the choice of the optimal route are formulated. The necessary initial data for calculating the optimal scheme of waste gravitation are described. The function of total route costs has been built.*
***Keywords:*** *municipal solid waste, garbage, waste management system in St. Petersburg, transport enterprise, processing, transport task.*

## Введение

Во всем мире ежеминутно производится огромное количество отходов. Вопросы организации эффективной системы работы с отходами, являются очень актуальными. От правильно организованной системы накопления, транспортировки, обработки или утилизации зависит экономическая эффективность и затраты пользователей системы. С одной стороны, предприятиям необходимо оптимизировать эксплуатационные затраты, а с другой – потребители системы требовательны к размеру тарифов на утилизацию твердых коммунальных отходов.

В разных уголках мира ситуация обстоит по-разному, но нельзя сказать, что, хотя бы в одной стране система работает идеально. Реформа ТКО провозглашенная в 2019 году в России году, призвана зарегулировать эту сферу деятельности. Суть реформы заключается в нескольких основных положениях, а именно:

– передача полномочий по организации системы обращения с твердыми коммунальными отходами на региональный уровень;

– выделение услуги по вывозу и сортировке мусора из числа коммунальных;

– изменение схемы обращения с ТКО;

– обязательное привлечение единого регионального оператора в качестве исполнителя;

– изменение схемы формирования платежей за вывоз и сортировку ТКО [3].

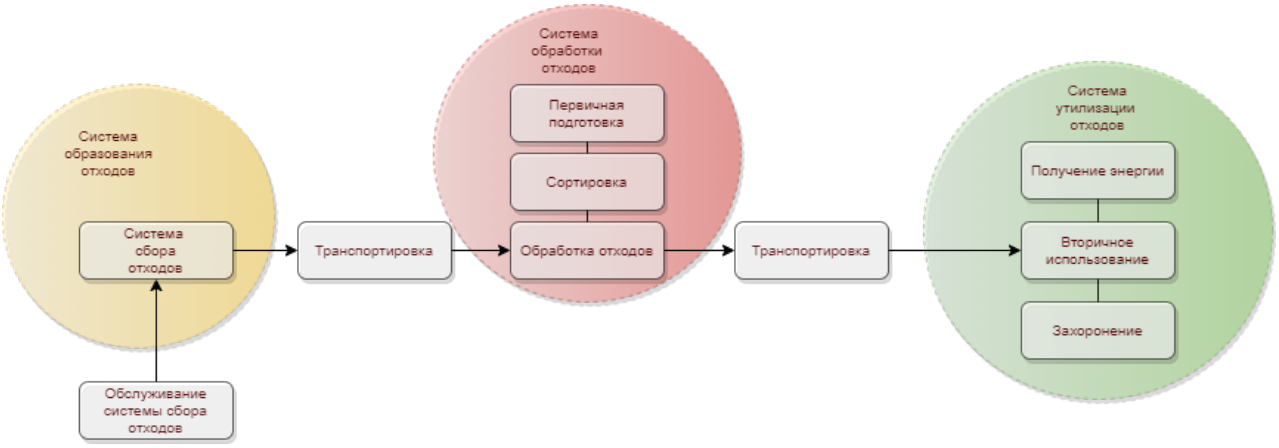



*Рис. 1. Структура процесса работы с отходами [2]*

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.

## Структура процесса работы с отходами

Сфера работы с отходами в сильнее всего зависит от системы транспорта, то есть, наиболее чувствительна к организации эффективной транспортной работы. Общая структура процесса обращения отходов представлена на рис. 1, из которого следует, что ключевым связывающим фактором работы системы является транспортировка. Кроме того, транспортировка является сферой, в которой сокращение затрат связано не только с вопросами привлечения инвестиций и капиталовложениями. Иными словами, эффективно организованная система транспортировки способна влиять на сокращение издержек без привлечения дополнительных инвестиций.

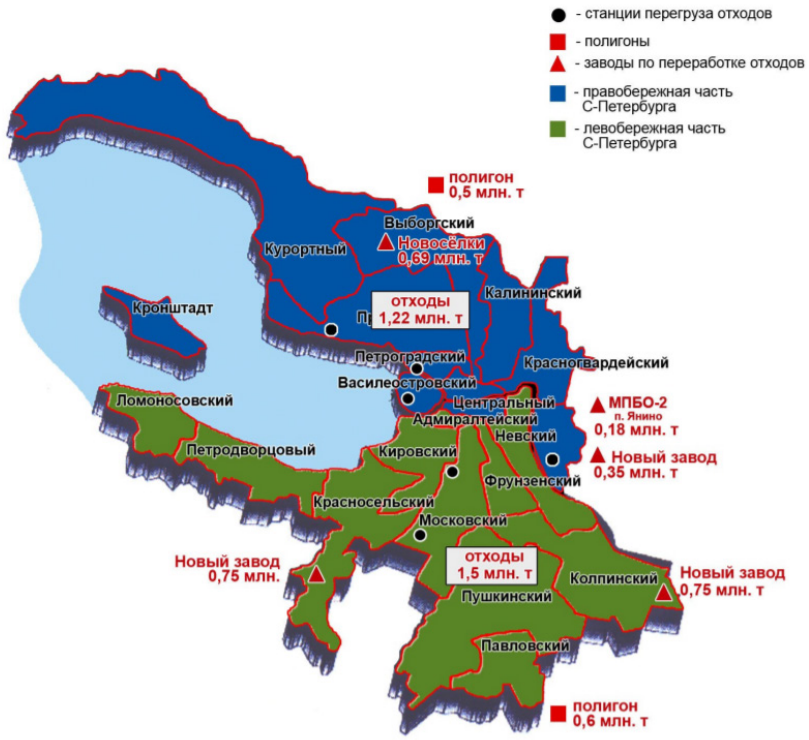



*Рис. 2. Схема образования отходов [1]*

*Рис. 3. Мусоровоз с бункером NTM [4]*

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. В качестве примера на рис. 2 представлена схема образования твердых коммунальных отходов в Санкт-Петербурге и их размещение в 2020 году согласно «Концепции долгосрочной целевой инвестиционной программы обращения с твердыми бытовыми и промышленными отходами в Санкт-Петербурге на 2012–2020 годы» [1]. На схеме нанесены объекты тяготения отходов внутри городской черты. Подробнее схемы тяготения потоков можно изучить, используя актуальную территориальную схему тяготения потоков ТКО в Санкт-Петербурге.

Задача регионального оператора и транспортных компаний не только построить территориальную схему тяготения потоков ТКО к полигонам и конечным точкам жизненного цикла ТКО, но грамотно распределить потоки на микроуровне по станциям перегруза. Очевидно, что одним из основных экономически значимых моментов в модели является построение территориальной схемы тяготения потоков отходов к пунктам перегруза и обработки отходов.

Для анализа и оптимизации системы на микроуровне необходимо проанализировать технологический процесс сбора отходов в мегаполисах.

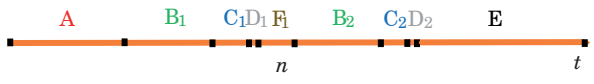



*Рис. 4. Технологическая схема работы мусоровоза на первой ступени: A – движение от базы к месту сбора отходов; $B_{1,2}$ – работа в режиме сбора; $C_{1,2}$ – движение на станцию перегруза; $D_{1,2}$ – разгрузка; $F_1$ – движение со станции перегруза к месту сбора; E – движение на базу после последней разгрузки; t – время работы мусоровоза на линии; n – количество циклов разгрузки в рамках работы на линии*

## Технологический процесс работы мусоровоза

Для сбора и транспортировки отходов во всем мире используются мусоровозы в бункерными прессующими установками (рис. 3), 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:

При изменении и оптимизации территориальных схем тяготения потоков ТКО внутри города, маршруты сбора отходов (B) 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 (A) статически неизменным.

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. Графическая визуализация условной работы мусоровоза на линии представлена на рис. 5.

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.

Основными параметрами, определяющими расходы на анализируемых участках маршрута, являются: сокращение расход топлива на маршруте, сокращение времени работы и сокращение общих издержек в пересчете на тонну ТКО. Для расчета необходимо иметь следующий набор исходных данных:

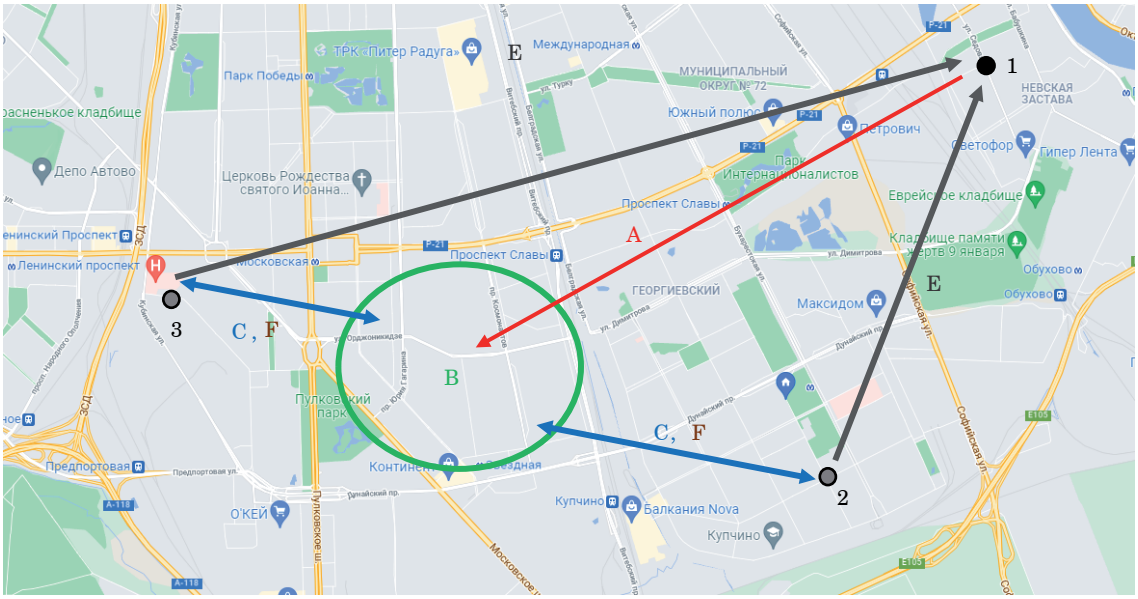



*Рис. 5. Графическое изображение маршрута при выборе альтернативных перегрузов*

– среднее расстояния до перегрузов от мест сбора;

– средний расход топлива мусоровоза в разрезе циклов транспортировки;

– стоимость литра топлива;

– стоимость часа рабочего времени водителя;

– средний вес разгрузки полного мусоровоза;

– средний вес последнего рейса мусоровоза (современные маршруты не всегда позволяют, комплектовать маршруты кратно полностью загруженным автомобилям);

– пересчет ремонтных и общепроизводственных расходов на километр пути мусоровоза.

Критерий выбора территориальной схемы для маршрута имеет вид (формула 1):

$$T_{сов} = \sum_{n=1}^{N} T_c + T_F + T_E \rightarrow \min, \qquad (1)$$

где $T_{сов}$ – совокупные издержки; $\sum_{n=1}^{N}$ – количество разгрузок на маршруте; $T_C$ – расходы при движении на станцию перегруза; $T_F$ – расходы при движении со станции перегруза на территорию сбора; $T_E$ – расходы при движении со станции перегруза на базу.

Для предприятия, имеющего М маршрутов модель общей оптимизации при выборе перегруза имеет вид (формула 2):

$$T_{сов} = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} T_c + T_F + T_E \rightarrow \min, \qquad (2)$$

где $T_{сов}$ – совокупные издержки; $\sum_{m=1}^{M}$ – количество маршрутов; $\sum_{n=1}^{N}$ – количество разгрузок на маршруте; $T_C$ – расходы при движении на станцию перегруза; $T_F$ – расходы при движении со станции перегруза на территорию сбора; $T_E$ – расходы при движении со станции перегруза на базу.

При решении задачи оптимизации с точки зрения мегаполиса и регионального оператора данный критерий должен рассматриваться в виде 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.

## Библиографический список

1. *Рубинов В. В.* Оценка динамики роста отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика. Вып. 3 (25). СПб.: ГУАП, 2020. С. 3–8.

2. *Rubinov V.* Problems of a Modern Approach to the Technological Process of Waste Management

Conference Proceedings: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. 2021.

3. *Черезова Н. В.* Проблемы утилизации твердых коммунальных отходов в связи с реализацией мусорной реформы в городском округе город Тюмень // Московский экономический журнал. 2020. № 1. С. 1–15.

4. Мусоровозы с задней загрузкой. URL: https://ntmrus.ru/catalog/z-z (дата обращения: 07.11.2021).

5. Федеральный закон РФ № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», принят государственной думой 22.05.1998. Постановлением № 2491-II ГД, подписан президентом РФ 24.06.1998 с изменениями по состоянию на 18.12.2006. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109 (дата обращения: 07.11.2021).

**УДК 656.025.6** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-108**

***А. А. Смирнова****
*магистрант*
***С. В. Уголков****
*кандидат военных наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СОЗДАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

*В статье рассматриваются вопросы создания транспортно-пересадочных узлов на территории Санкт-Петербурга. Проводится анализ проблем транспортного обслуживания. Рассматривается необходимость создания транспортно-пересадочных узлов.*
***Ключевые слова:*** *транспортно-пересадочный узел, пассажиропоток, общественный транспорт.*

***A. A. Smirnova****
*Postgraduate Student*
***S. V. Ugolkov****
*PhD of Military Sc., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# CREATION OF TRANSPORT HUBS ON THE TERRITORY OF ST. PETERSBURG AS A FACTOR IN INCREASING THE EFFICIENCY OF PASSENGER TRAFFIC

*The article deals with the creation of transport hubs in the territory of St. Petersburg. The analysis of the problems of transport services is carried out. The need to create transport hubs is being considered.*
***Keywords:*** *transport hub, passenger traffic, public transport.*

## Введение

Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга является одним из главных факторов привлекательности города для жизни людей.

Большая плотность сети общественного транспорта – залог высокого качества жизни. Транспортные системы должны обеспечивать высокую эффективность и доступность для всех граждан, при этом необходимо гарантировать личную безопасность людей [1].

## Способы повышения эффективности пассажирских перевозок

Проводя анализ современной транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга вряд ли ее можно назвать удовлетворительной, скорее наоборот. Одной из главных проблем является то, что улицы перегружены и забиты припаркованными автомобилями. Это связано с высоким темпом роста интенсивности движения, а именно автомобилизации и крупными грузопотоками, а также недостаточной организацией дорожного движения [2].

Всего в Санкт-Петербурге около 1225 перекрестков, из них на 245 (20 %) регулярно возникают заторы, а скорость движения на заторовых направлениях достигает 6–9 км/час. Примерная картина происходящего в пиковые часы нагрузки на автомобильных дорогах показана на рис. 1 [3].

В результате анализа были выделены способы повышения эффективности пассажирских перевозок:

– повысить качество обслуживания людей на городском транспорте;

– снизить количество регистрируемых дорожно-транспортных происшествий;

– увеличить долю перевозки пассажиров всеми видами общественного транспорта;

– увеличить процент населения, проживающего в пешей доступности от станций метрополитена;

*Рис. 1. Карта Санкт-Петербурга в час пик*

– увеличить протяженность автомобильных дорог, а также протяженность линии метрополитена;

– развивать водный и железнодорожный общественный транспорт [4].

## Соотношение пассажирских перевозок во внутригородском сообщении

На данный момент в Санкт-Петербурге 461 автобусный маршрут, 45 троллейбусных маршрутов, 42 трамвайных маршрута, 393 направления маршрутного такси, 5 линий метрополитена (72 станции), 74 маршрута электропоезда [5].

В пассажирских перевозках на данный момент доминирует метрополитен – 40,6 %. Соотношение пассажирских перевозок во внутригородском сообщении составляет 23,0 % – автобусы, трамваями – 10,7 %, троллейбусами – 6,4 %. Оставшиеся 19,3 % перевозок приходятся на маршрутные такси. Более наглядно это можно увидеть на диаграмме:

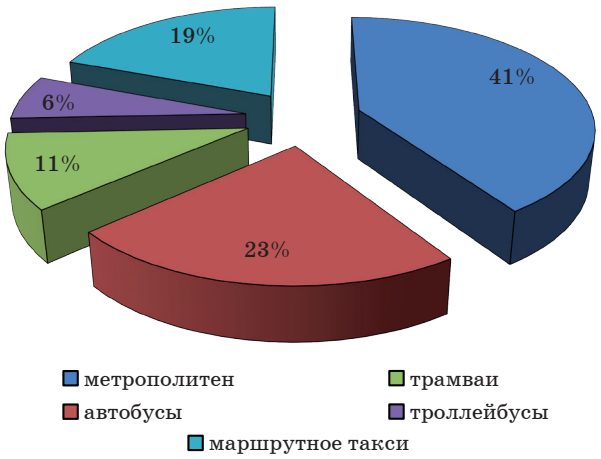



*Диаграмма 1. Соотношение пассажирских перевозок во внутригородском сообщении Санкт-Петербурга*

Очевидно, что большую долю пассажирских перевозок занимает метрополитен. Следовательно, можно сделать вывод, что без развития транспортно-пересадочных узлов метрополитена невозможно улучшение систем движения и регулирования транспортных потоков [6].

## Перспективы развития транспортно-пересадочных узлов в Санкт-Петербурге

Главная задача транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) – удобная пересадка пассажиров с одного вида транспорта на другой, что помогает «разгружать» основные транспортные узлы Санкт-Петербурга.

В июне 2021 года на Петербургском Международном Экономическом Форуме (ПМЭФ) было заявлено о 61 ТПУ в Санкт-Петербурге, общей суммой более 186 млрд рублей [7].

По данным Петростата, на 1 января 2021 года население Санкт-Петербурга составляет 5 384 342 человека. Доля пассажирских перевозок составляет около 5 млн человек в день, и около 2 млрд человек в год [8].

Комитетом по развитию транспортной инфраструктуры было выделено 29 транспортно-пересадочных узлов, требующих развития в перспективе к 2038 году. Все 29 ТПУ приведены на рис. 2.

В табл. 1 приведены средние показатели движения в Санкт-Петерубрге [9].

*Таблица 1*

**Средние показатели движения в Санкт-Петерубрге**

| Показатель | Личный транспорт | Общественный транспорт |
|---|---|---|
| Средняя длинна маршрута, км | 15,7 | 16,1 |
| Среднее время поездки, мин. | 1,15 | 1,05 |
| Средняя скорость поездки, км/ч | 12,6 | 14,3 |

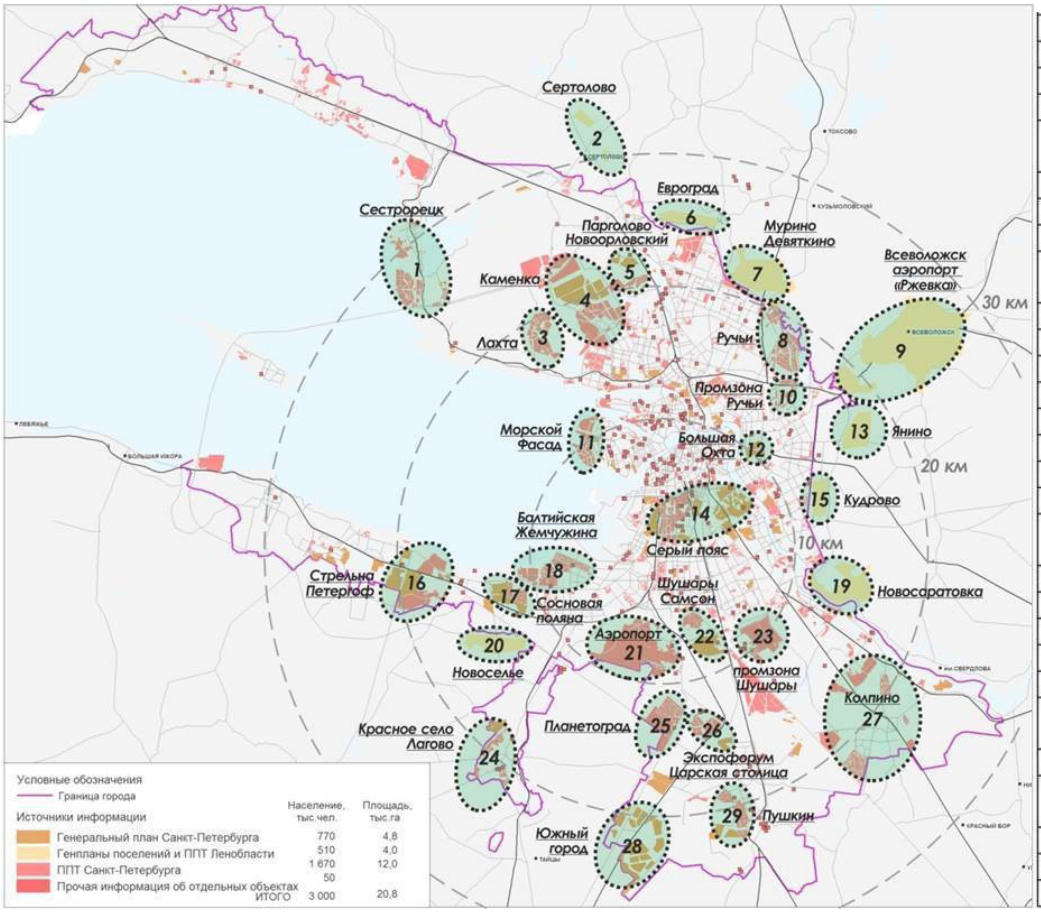
## Заключение

Предпосылками для создания большего числа транспортно-пересадочных узлов являются:

– высокая интенсивность транспортных и пешеходных потоков;

– удовлетворительная оснащенность мест накопления транспорта;

– наличие пробок из города;




| | |
|---|---|
| 1 | Сестрорецк |
| 2 | Сертолово |
| 3 | Лахта |
| 4 | Каменка |
| 5 | Парголово, Новоорловский |
| 6 | Еврoград |
| 7 | Мурино, Девяткино |
| 8 | Ручьи |
| 9 | Всеволожск, аэропорт Ржевка |
| 10 | Промзона Ручьи |
| 11 | Морской Фасад |
| 12 | Большая Охта |
| 13 | Янино |
| 14 | Серый пояс |
| 15 | Кудрово |
| 16 | Стрельна, Петергоф |
| 17 | Сосновая Поляна |
| 18 | Балтийская Жемчужина +СЗПЧ |
| 19 | Новосаратовка |
| 20 | Новосельe |
| 21 | Аэропорт |
| 22 | Самсон, Шушары |
| 23 | Промзона Шушары |
| 24 | Красное Село, Лаголово |
| 25 | Планетоград |
| 26 | Экспофорум, Царская столица |
| 27 | Колпино |
| 28 | Южный город |
| 29 | Пушкин |

*Рис. 2. Основные направления развития ТПУ в Санкт-Петербурге*

– аварийность.

Также можно отметить, что ТПУ – узловой элемент структуры города. Помимо транспортной функции, реализуются еще и задачи социального обеспечения населения, результатом которого является сосредоточение значительного числа объектов досугового и торгово-бытового обслуживания населения.

На данный момент пассажирам, пересаживающимся с одного вида транспорта на другой (например, с метрополитена на наземный транспорт), приходится преодолевать около 300–400 м. Усугубляется проблема тем, что не на всех станциях (остановках) имеются указатели.

Необходимо увеличить простоту ориентации в пространстве с помощью хорошего освещения всех остановочных пунктов, входов и выходов, а также установкой хорошо идентифицируемых указателей и системы видеонаблюдения.

**Библиографический список**

1. Постановление правительства Санкт-Петербурга от 13 июля 2011 года № 945 (с изменениями от 14 июня 2017 года) «О транспортной стратегии Санкт-Петербурга до 2025 года».

2. Государственная программа Санкт-Петербурга «Развитие транспортной системы Санкт-Петербурга».

3. Сервис аналитики «Яндекс. Карты». URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/?ll=30.467098 %2C59.941223z=14 (дата обращения: 17.11.2021).

4. Стратегия экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года. Комитет по экономической политике и стратегическому планированию Санкт-Петербурга, 2015. 128 с.

5. Общественный транспорт Санкт-Петербурга. URL: https://avtobus-marshruty.ru/sankt-peterburg (дата обращения: 20.11.2021).

*6. Евреенова Н. Ю.* Моделирование функционирования транспортно-пересадочного узла // Мир транспорта. 2014. № 5. С. 170–176.

7. Новостной портал «Деловой Петербург». URL: https://www.dp.ru/a/2021/09/06/Razvjazat_i_zarabotat (дата обращения: 24.11.2021).

8. Управление Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области. URL: https://petrostat.gks.ru (дата обращения: 28.11.2021).

9. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. URL: https://krti.gov.spb.ru (дата обращения: 30.11.2021).

**УДК 656.01/656.09** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-112**

***В. Е. Таратун****
*старший преподаватель*
***Е. А. Таратун****
*ассистент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

*В статье рассмотрена городская агломерация Санкт-Петербурга, рассмотрены существующие системы автоматизации управления дорожного движения, а также освящена необходимость внедрения транспортных систем, построенных на базе искусственного интеллекта, обозначены существующие трудности, замедляющие развитие и внедрение транспортных систем интеллектуализации дорожного управления.*
***Ключевые слова:*** *транспортная отрасль, интеллектуальные транспортные системы, автоматизированные системы управления дорожным движением, городская агломерация Санкт-Петербурга.*

***V. E. Taratun****
*Senior Lecturer*
***E. A. Taratun****
*Assistant*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS AND THEIR IMPACT ON THE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF ST. PETERSBURG

*The article examines the urban agglomeration of St. Petersburg, considers the possibilities of the traffic control system, and also sanctifies the introduction of transport systems built on the basis of artificial intelligence, identifies the interfaces that slow down the development and implementation of transport systems for the intellectualization of road management.*
***Keywords:*** *transport industry, intelligent transport systems, automated traffic management systems, urban agglomeration of St. Petersburg.*

## Введение

Одной из важнейших отраслей, любой городской агломерации является транспортная отрасль. Транспорт – это системообразующая «артерия» экономики, которая должна в полной мере обеспечить жизнедеятельность и социально-экономическое развитие региона. В целом при рассмотрении инвестором региона, особое внимание уделяется именно транспорту, так как он играет важную роль в развитии внутренней и внешней торговли. В конечном счете можно точно сказать, что транспортная отрасль оказывает существенное влияние на инвестиционную привлекательность, в том числе способствует росту конкурентоспособности российских предприятий и улучшению качества жизни населения.

Рассматривая транспортную систему Санкт-Петербурга и Ленинградской области, стоит отметить ее разнообразие. Так, городская транспортная система включает в себя: автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт, морской, внутренний водный, воздушный. Также в Санкт-Петербурге имеются трубопроводные виды транспорта, городской пассажирский транспорт: это метрополитен, трамваи, троллейбусы, автобусы, таксомоторные виды транспорта, дорожное хозяйство и т. д.

В соответствии со статьей «Анализ эффективности внедрения автоматизированных систем управления дорожным движением в транспортные системы мегаполиса Санкт-Петербурга» важным компонентом улучшения транспортной ситуации в Санкт-Петербурге являются мероприятия по организации дорожного движения, направленные на повышение пропускной способности и безопасности дорожной сети. Эти меры в основном заключаются во

внедрении в практику средств интеллектуальных транспортных систем (далее – ИТС).

Далее рассмотрим ИТС, обслуживающие транспортную систему Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

## Исследование существующих автоматизированных систем управления дорожным движением

Рассматривая вопросы повышения эффективности работы систем, основной задачей которых является управление дорожным движением – одним из методов повышения является использование автоматизированных систем (далее – АСУДД). Данные системы так же связаны с внутренними элементами системы дорожного движения такими как: дорожные знаки на транспортных потоках, наличие дорожной разметки и т. д. Применение данного класса систем позволяют выработать новые проектные решения для реализации задачи улучшения движения на транспортных потоках.

В соответствии с информацией, представленной на официальном информационном портале Санкт-Петербургского государственного управления «Дирекция по организации дорожного движения Санкт-Петербурга», данного класса система предназначена для управления движением транспортных средств и пешеходных потоков на дорожной сети города или автомагистрали».

В рамках Санкт-Петербурга существуют следующие АСУДД:

– АСУДД для участка КАД, реализующего связующее звено между комплексом защитных элементов единой системы Санкт-Петербурга от наводнений;

– АСУДД КАД;

– АСУДД ЗСД;

– АСУДД автодороги А–121 «Сортавала»;

– АСУДД автодороги А–181 «Скандинавия»;

– АСУДД Санкт-Петербурга, включая Кронштадт, Ломоносов, Красное Село, Пушкин, Колпино и Курортный район.

## Исследование структуры и основного принципа работы систем автоматизации и управления дорожным движением

Рассмотрим принцип работы одной из АСУДД КАД Санкт-Петербурга. Данная система обеспечила основу для формирования ИТС Северо-Западного региона. АСУДД КАД была запущена в 2011 году и делится на следующие подсистемы:

– «система управления дорожным движением»;

– «система дорожного видеонаблюдения»;

– «система метеорологического обеспечения».

В центральный пункт управления передается все актуальные на данный момент информационные потоки, которые определяют такие показатели, как: текущее состояние транспортных потоков улично-дорожной сети, спецификация транспортных потоков, погодные условия, текущее состояние дорожного покрытия и существующей на каждом транспортном потоке разметки. Под центральным пунктом управления подразумевается определенное здание, где размещено серверное оборудование и специализированное программное обеспечение, с помощью которого происходит обработка поступающей информации и на основе определенных алгоритмов. Система позволяет осуществлять работу как в ручном, так и в автоматизированном и автоматическом режимах. При этом доведение дорожно-транспортной ситуации до участников дорожного движения осуществляется с помощью информационных табло и многопозиционных указателей, а также с помощью сервиса «Яндекс. Карты» и иных информационных платформ.

Помимо указанных АСУДД в Санкт-Петербурге существует система на основе которой обеспечивается видеонаблюдение за дорожно-транспортной обстановкой в Санкт-Петербурге.

Также стоит отметить создание такого проекта как «Комплексная информационная система управления городским и пригородным пассажирским транспортом». Создание данной системы в соответствии с информацией, представленной на официальном сайте Комитета по информатизации и связи, обусловлено необходимостью применения в транспортной отрасли Санкт-Петербурга информационной системы с существенно расширенными функциональными возможностями.

Конечно, рассмотренное ранее не является полным списком ИТС обслуживающие Санкт-Петербург. При этом, учитывая количество ИТС, существуют трудности, тормозящие их развитие и внедрение в городскую агломерацию Санкт-Петербурга.

## Заключение

Существует несколько проблем, которые на сегодняшний день сдерживают развитие и внедрение ИТС.

Первое, что хотелось бы отметить, – это низкий уровень конкуренции при выработке технических решений по управлению дорожным движением.

Второе – это разрозненность всех существующих АСУДД, в том числе отсутствие единой платформы и курирующей организации.

Третье – это слабое информирование населения о работе транспортной системы.

Четвертое – это низкий уровень проработки дорожной транспортной ситуации и как следствие не оптимальный вариант работы транспортного узла.

Санкт-Петербург является уникальным городом, имеет богатейшую историю и наследия, это позволяет притягивать множество туристов и конечно внедрение ИТС позволить повысить привлекательность города. Учитывая стремительное развитие города, расширение географии застройки, необходимо решать имеющиеся проблемы комплексно. Кроме того, стоит рассмотреть существующий опыт внедрения интеллектуальных транспортных систем, используемых в сфере дорожного хозяйства, имеющийся в странах Европы.

**Библиографический список**

1. *Таратун В. Е., Лось Е. А.* Анализ интеллектуальных технологий управления предприятием. Системный анализ и логистика. № 2 (15). С. 12–17.

2. *Таратун В. Е., Лось Е. А.* Анализ эффективности внедрения автоматизированных систем управления дорожным движением в транспортные системы мегаполиса Санкт-Петербурга // Организация и безопасность дорожного движения. Материалы XIII Национальной научно-практ. конф. с международным участием (Тюмень, 19 марта 2020 г.). С. 336–341.

3. Официальный сайт СПб ГКУ «Дирекция по организации дорожного движения Санкт-Петербурга». URL: https://gudodd.ru/ (дата обращения: 06.12.2021).

4. Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. URL: https://krti.gov.spb.ru/ (дата обращения: 06.12.2021).

5. Комитет по транспорту. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/c_transport/ (дата обращения: 06.12.2021).

**УДК 656.025.4** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-115**

***О. В. Тычко****
*магистрант*
***С. В. Уголков****
*кандидат военных наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ФРУКТОВ ИЗ ТАИЛАНДА В РОССИЙСКУЮ ФЕДЕРАЦИЮ

*В статье рассматривается вопрос организации транспортировки свежего манго. Проводится подробный анализ специализированного подвижного состава и необходимых для скоропортящихся фруктов условий для транспортировки на воздушном, железнодорожном, морском и автомобильном транспорте. Оптимальный вариант транспортировки определяется на основании сравнения коммерческой работы по маршрутам перевозки.*
***Ключевые слова:*** *манго, организация перевозки, рефрижераторный контейнер, стоимость перевозки, время перевозки, технология транспортировки.*

***O. V. Tychko****
*Postgraduate Student*
***S. V. Ugolkov****
*PhD of Military Sc., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# FEATURES OF ORGANIZING THE TRANSPORTATION OF PERISHABLE FRUIT FROM THAILAND TO THE RUSSIAN FEDERATION

*The article deals with the organization of transportation of fresh mango. A detailed analysis of specialized rolling stock and necessary conditions for transportation of perishable fruits by air, rail, sea and automobile transport is carried out. Optimal transportation option is determined on the basis of comparison of commercial work on transportation routes.*
***Keywords:*** *mango, transportation organization, refrigerated container, transportation cost, transportation time, transportation technology.*

## Введение

Манго – костянка, плод вечнозеленого тропического дерева рода Манго, которое вырастает не более 20 метров в высоту. Плоды желтого цвета имеют овальную форму, плотную и сочную мякоть и сладковатый вкус, они похожи на большую грушу с косточкой внутри [1]. Одной из наиболее подходящих стран для созревания манго является Таиланд, здесь он считается королем экзотических фруктов.

У Россиян этот экзотический фрукт пользуется большой популярностью. С каждым годом поставки манго непрерывно растут. И одним из крупнейших импортеров манго в Российскую Федерацию, который уступает только Индии и Китаю, является Таиланд, поставляющий этот фрукт десятками тысяч тонн.

## Обоснование вида транспорта и подвижного состава

Манго – скоропортящийся фрукт. Его отличительной особенностью является ограниченный срок годности. При транспортировке манго требует особых условий – это соблюдение влажностного и температурного режимов, санитарно-гигиенических норм и сроков доставки, осуществление вентилирования грузового помещения и перевозка в специализированном подвижном составе [1].

В статье рассматривается организация транспортировки манго из плантации Чантхабури (Таиланд) в Санкт-Петербург (Российская Федерация) четырьмя маршрутами:

1. Смешанная перевозка автомобильным и воздушным транспортом.

2. Прямая перевозка железнодорожным транспортом.

3. Смешанная перевозка морским и железнодорожным транспортом.

4. Смешанная перевозка морским и автомобильным транспортом.

Следовательно, чтобы минимизировать материальные и временные затраты для маршрутов смешанной перевозки, в качестве грузового помещения рассмотрим стандартный 40-футовый рефрижераторный контейнер фирмы «ThermoKingScroll» [2].

*Таблица 1*

**Технические характеристики 40-футового рефконтейнера 40'RC «ThermoKingScroll»**

| Характеристики | Показатели |
|---|---|
| Внешние размеры | |
| Длина, мм | 12 192 |
| Ширина, мм | 2 438 |
| Высота, мм | 2 591 |
| Внутренние размеры | |
| Длина, мм | 11 638 |
| Ширина, мм | 2 284 |
| Высота, мм | 2 252 |
| Размеры дверного проема | |
| Ширина, мм | 2 285 |
| Высота, мм | 2 155 |
| Размеры дверного проема | |
| Ширина, мм | 2 285 |
| Высота, мм | 2 155 |
| Весовые параметры | |
| Вес, т | 4,7 |
| Грузоподъемность, т | 26,3 |
| Максимальная масса, т | 31,00 |
| Объем, м$^3$ | 59,8 |
| Количество вмещаемых паллет | |
| Европаллет (1200×800), шт | 23 |

Перевозка контейнеров морским транспортом осуществляется с помощью контейнеровоза «TSBANGKOK» (табл. 2) [2].

*Таблица 2*

**Технические характеристики контейнеровоза «TSBANGKOK»**

| № п/п | Параметры | Значения |
|---|---|---|
| 1 | Длина, м | 169 |
| 2 | Ширина, м | 27,5 |
| 3 | Осадка, м | 9,7 |
| 4 | Грузоподъемность, т | 21 361 |
| 5 | Валовой тоннаж, т | 17 449 |
| 6 | Скорость (Макс/Средняя) | 16,2 узлов/ 13,9 узлов |

Транспортировка манго по смешанному маршруту в контейнерах по железной дороге осуществляется с помощью железнодорожных платформ. В данной работе рассматривается платформа для рефрижераторных контейнеров, модель 13-401М (табл. 3) [3].

*Таблица 3*

**Характеристика железнодорожной платформы**

| № п/п | Параметры | Значения |
|---|---|---|
| 1 | Грузоподъемность, т | 70 |
| 2 | Габарит | 0-ВМ |
| 3 | Длина, мм:<br>– по осям сцепления автосцепок<br>– по концевым балкам рамы | <br>14620<br>13400 |
| 4 | Щирина максимальная, мм | 3140 |
| 5 | Высота от УГР до пола, мм | 1310 |

Транспортировка манго по прямому маршруту железнодорожным транспортом осуществляется с помощью различных типов подвиж-

*Рис. 1. 40-й рефрижераторный контейнер с внешними размерами*

а) б)

*Рис. 2. Рефрижераторные вагоны на маршрутах: а – 4-осный вагон модели Habis-6/8 (Trapo); б – АРВ модели 16-5213*

ного состава. Это связано с различной шириной колеи в странах, через которые проследует состав.

1. По маршруту Маптхапхут (Таиланд) – Нонгкхай (Таиланд) – Таналанг (Лаос) – Вьентьян (Лаос) с шириной колеи 1000 мм перевозка осуществляется в 4-осном рефрижераторном вагоне повышенной вместимости для узкоколейной железной дороги модели Habis-6/8 (Trapo) [4] (рис. 2*а*, табл. 4).

2. По маршруту Вьентьян (Лаос) –Ботен (Лаос) – Менгла (Китай) – Куньмин (Китай) – Чэнду (Китай) – Баоцзи (Китай) – Урумчи (Китай) – Алашанькоу (Китай) используется этот же подвижной состав только с колесной парой шириной 1435 мм.

3. На пограничной с Казахстаном станции Алашанькоу осуществляется операция по перевалке груза на другой тип подвижного состава, который проследует по маршруту Достык (Казахстан) – Карталы (Российская Федерация) – Санкт-Петербург (Российская Федерация) в автономном рефрижераторном вагоне модели 16-5213 (рис. 2*б*, табл. 4) [3].

*Таблица 4*

**Технические характеристики рефрижераторных вагонов**

| Параметры | Значения | |
|---|---|---|
| | Habis-6/8 (Trapo) | АРВ модели 16-5213 |
| Внутренние размеры, м: | | |
| длина | 19,5 | 19,32 |
| ширина | 2,6 | 2,69 |
| высота | 3 | 2,5 |
| Объем кузова внутренних размеров, $м^3$ | 152 | 126 |
| Площадь пола, $м^2$ | 50,7 | 50,4 |
| Грузоподъемность, т | 50 | 55,0 |
| Масса тары вагона, т | 32 | 44,8 |

Транспортировка контейнеров автомобильным транспортом по маршруту смешанной перевозки осуществляется с использованием контейнеровоза-полуприцепа Kögel S24-2 SWCT 24P 130AV 40 [5]. Транспортировка манго автомобильным транспортом до аэропорта Суварнабхуми осуществляется с использованием автомобильного рефрижератора-полуприцепа Тонар-97862 (табл. 5) [6].

*Таблица 5*

**Технические характеристики полуприцепа**

| Параметры | Значения | |
|---|---|---|
| | Kögel S24-2 SWCT 24P 130AV 40 | Тонар-97862 |
| Размеры полуприцепа (длина/ширина/высота), мм | 1275/2550/1125 | 14250/2560/2460 |
| Грузоподъемность, кг | 35000 | 29 040 |
| Полная масса, кг | 41000 | 38 500 |
| Количество осей/колес | 3/6+1 | 3/6+1 |
| Высота ССУ тягача, мм | 1120-1220 | 1150 |

Седельный тягач Scania CNGG340 LA 4×2 MNA для перевозки манго по автомобильным маршрутам (табл. 6) [7].

*Таблица 6*

**Технические характеристики тягача**

| Параметры | Значения |
|---|---|
| Размеры кабины (длина/ширина/высота), мм | 2260/2430/2550 |
| Колесная база, мм | 3700 |
| Высота ССУ, мм | 1150 |
| Максимальная допустимая нагрузка на переднюю ось, кг | 7500 |
| Максимальная допустимая нагрузка на заднюю ось, кг | 11500 |
| Комплект газовых баллонов | 8 шт. × 103 л = 824 л |

Комбинация соответствует требованиям для перевозки манго, так как погрешность высоты

седла тягача к высоте седла полуприцепа KögelS24-2 SWCT 24P и рефрижераторного полуприцепа Тонар-97862 меньше 0,05 м.

Авиаперевозка манго из аэропорта Суварнабхуми (Бангкок) осуществляется на воздушном судне Boeing 777 Freighter, которое имеет следующие характеристики [8]:

Грузоподъемность – 102,8 т.

Дальность перелета с полной полезной нагрузкой – 9038 км.

Вмещает:

– 27 стандартных поддонов (2,5 на 3,1 м) на главной палубе.

– 10 стандартных поддонов в нижнем грузовом отсеке, также 17 м$^3$ дополнительных навалочных грузов.

Грузовым помещением для манго при перевозке на воздушном судне является универсальный изоляционный рефрижераторный авиационный контейнер модели LD-9 по классу ИАТА –RAP охлаждающий контейнер на основе P1P (табл. 7) [8].

*Таблица 7*

**Характеристика авиационного контейнера**

| № п/п | Параметры | Значения |
|---|---|---|
| 1 | Код IATA | LD-9 рефрижератор |
| 2 | Класс IATA | Тип 5 |
| 3 | Описание | Изолированный авиаконтейнер с жесткой дверью |
| 4 | Дверь | 2,16 × 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<br>– длина<br>– ширина<br>– высота | <br>– 3,175<br>– 2,235<br>– 1,626 |

## Транспортная маркировка груза

«Маркировка потребительской упаковки с плодами манго выполняется с указанием:

– наименования продукта («Манго») [1];

– наименования и местонахождения изготовителя [юридический адрес, включая страну, и, при несовпадении с юридическим адресом, адрес (а) производств (а)] и организации, уполномоченной изготовителем на принятие претензий от потребителей на территории государства (при наличии);

– товарного знака изготовителя (при наличии);

– страны происхождения и при необходимости района производства или его национального, регионального или местного названия;

– массы нетто продукции в упаковочной единице или количества плодов;

– помологического сорта (не обязательно);

– товарного сорта;

– калибра, выраженного минимальной и максимальной массой плодов;

– обозначения калибра (при необходимости);

– даты сбора и даты упаковывания;

– условий хранения;

– сведений о применении генно-модифицированных организмов: в том случае, если продукция содержит более 0,9 % генно-модифицированных организмов, в маркировке приводят информацию об их наличии (например, «генно-модифицированные продукты»);

– обозначения настоящего стандарта;

– информации о подтверждении соответствия».

Транспортная маркировка тары выполняется по ГОСТ 14192 с нанесением манипуляционных знаков: «Скоропортящийся груз» и «Ограничение температуры» [9].

## Характеристика маршрутов

Для выявления оптимального варианта транспортировки манго необходимо провести сравнение коммерческих показателей перевозки.

Описание маршрута № 1: плантация Чантхабури – аэропорт Суварнабхуми автомобильным транспортом; аэропорт Суварнабхуми – аэропорт Шереметьево (Москва) – аэропорт Пулково (Санкт-Петербург) авиационным транспортом. Расстояние 7072 км. Для транспортировки используется рефрижераторный полуприцеп Тонар-97862 и седельный тягач Scania CNGG340 LA 4×2 MNA наземным транспортом, Boeing 777 Freighter и авиационный контейнер модели LD-9 авиационным транспортом.

Описание маршрута № 2: ж.д. станция Маптхапхут (Районг (Таиланд)) – сеть Трансазиатских железных дорог Лаос, Китай, Казахстан – ж.д. станция Санкт-Петербург-Сортировочный Московский железнодорожным транспортом. Расстояние 10 750,8 км. Для транспортировки используется рефрижераторный вагон повышенной вместимости для узкоколейной железной дороги модели Habis-6/8 (Trapo) и рефрижераторный вагон автономный модели 16-5213.

Описание маршрута № 3: порт Лаем Чабанг – порт Бендер Аббас морским транспортом; ж.д. станция Бендер Аббас – ж.д. станция Санкт-

*Рис. 3. Общая схема маршрутов*

Петербург-Сортировочный Московский железнодорожным транспортом. Расстояние 13 169 км. Для транспортировки используется платформа для рефконтейнеров модели 13-401М железнодорожным транспортом и контейнеровоз «TSBANGKOK» морским транспортом.

Описание маршрута № 4: порт Лаем Чабанг – порт Новороссийск морским транспортом; Новороссийск – Санкт-Петербург наземным транспортом. Расстояние 15 227 км. Для транспортировки используется контейнеровоз «TSBANGKOK» морским транспортом, полуприцеп Kögel S24-2 SWCT 24P 130AV 40 и тягач Scania CNGG340 LA 4x2 MNA наземным транспортом.

Сравнение коммерческих и временных показателей перевозки по маршрутам

Итоговые стоимость и время доставки по маршрутам [10]–[13]:

*Маршрут № 1*:

Протяженность маршрута:

L=250 км (авто) + 7705 км (авиа) = 7955 км.

Провозная плата:

П=650 417 руб. (авто)+37 268 116 руб. (авиа) = =37 918 533 руб.

Время доставки:

$T_{дост}$=15 ч. (авто)+ 22 ч. (авиа)= = 37 ч. или 1 сут. и 13 ч.

*Маршрут № 2*:

Протяженность маршрута:

L=745 км + 453 км + 4375,8 км + 2196 км + +2 981 км = 10 750,8 км (ж.д.).

Провозная плата:

П= 262 864 руб. + 149 356 руб. + 672 552 руб. + +405 279 руб. + 765 707 руб.= 2 255 758 × 7= =15 790 306 руб. (ж.д.).

Время доставки:

$T_{дост}$=2 сут. 9 ч. + 1 сут. 3 ч. + 7 сут. 15 ч. + +2 сут. 15 ч. + 3 сут. 13 ч. = =17 суток и 7 часов. (ж.д.).

*Маршрут № 3*:

Протяженность маршрута:

L= 7630 км (море) + 5539 км (ж.д.) = 13 169 км.

Провозная плата:

П= 2 750 722 руб. (море) + 12 865 197 руб. (ж.д.) = 15 615 919 руб.

Время доставки:

$T_{дост}$=13 сут. (море) + 7 сут. и 21 ч. (ж.д.) = =20 сут. и 21 ч.

*Маршрут № 4:*

Протяженность маршрута:

L = 12890 км (море) + 2337 км (авто) = = 227 км.

Провозная плата:

П=4698014 руб. (море) + 2781945 руб. (авто) = =7 479 959 руб.

Время доставки:

$T_{дост}$= 20 сут. (море) + 2 сут. и 13 ч. (авто) = =22 сут. и 13 ч.

Необходимо определить оптимальный вариант транспортировки груза. Это можно сделать, используя два основных показателя [14]:

1. Экономическим показателем работы транспорта, зависящим от дальности перевозки и массы груза, является средняя стоимость 1 тонно-километра груза на маршрутах перевозки, который вычисляется по следующей формуле:

$$Q_i = \frac{E_i}{M \times L_i}, \quad (1)$$

где $E_i$ – общая провозная плата на $i$ маршруте, руб; $M$ – общая масса перевозимого груза, т; $L_i$ – общая протяженность на імаршруте, км.

Общая масса перевозимого груза – 250,58 т брутто, 231,686 т нетто.

Таким образом, получаем следующие показатели средней стоимости тонно километра на маршрутах:

$$Q_1 = \frac{37918533\,руб}{231{,}686m \times 7955км} = 20{,}57, \text{ руб./т} \times \text{км};$$

$$Q_2 = \frac{15790306\,руб}{231{,}686m \times 10750{,}8км} = 6{,}34, \text{ руб./т} \times \text{км}$$

*Таблица 8*

**Сравнительные показатели времени и стоимости перевозок**

| № маршрута | Пункт отправления-назначения | Количество ПС и его вид | Протяженность маршрута, км | Время доставки, сут | Стоимость, Руб./год | Руб./т км | Отношение стоимости перевозки к стоимости груза, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 (авто, авиа) | № 1а: Чантхабури – Аэ Суварнабхуми (авто) | № 1а: 10 шт. реф-х полуприцепов Тонар-97862 | 7955 | 1,54 | 37 918 533 | 20,57 | 0,109 |
| | № 1б: Аэ Суварнабхуми-Аэ Шереметьево – Аэ Пулково (авиа) | № 1б: 2 Boeing 777 Freighter | | | | | |
| 2 (ж.д.) | № 2: ст. Маптхапхут – ст. Санкт-Петербург | № 2: 1.7 шт. реф Habis-6/8 (Trapo) 2.7 шт. реф. 16-5213 | 10 750,8 | 17,29 | 15 790 306 | 6,34 | 0,0454 |
| 3 (море, ж.д.) | № 3а: порт Лаем Чабанг – порт Бендер-Аббас (море) | № 3а: контейнеровоз «TS BANGKOK» | 13 169 | 20,87 | 15 615 919 | 5,12 | 0,0449 |
| | № 3б: ст.Бендер-Аббас – ст. Санкт-Петербург (ж.д.) | № 3б: 1. 15 шт. 2.15 шт. фит. ж.д. платформ 13-401М | | | | | |
| 4 (море, авто) | № 4а: порт Лаем Чабанг – порт Новороссийск (море) | № 4а: контейнеровоз «TS BANGKOK» | 15 227 | 22,54 | 7 479 959 | 2,1 | 0,022 |
| | № 4б: порт Новороссийск – Санкт-Петербург (авто) | № 4б: 15 шт. полуприцепов – контейнеровозов | | | | | |

$$Q_3 = \frac{15615919\,руб}{231{,}686m \times 13169км} = 5{,}12, \text{руб./т} \times \text{км};$$

$$Q_4 = \frac{7479959\,руб}{231{,}686m \times 15227км} = 2{,}1, \text{руб./т} \times \text{км}$$

2. Вместе с тем данный показатель не может дать полную объективную оценку груза, который транспортируется, так как не учитывает его род. Поэтому при выборе оптимального варианта будем также учитывать и показатель отношения стоимости перевозки по отношению к стоимости всего груза.

Этот показатель вычисляется по следующей формуле:

$$R_i = \frac{E_i}{C}, \qquad (2)$$

где $E_i$ – общая провозная плата на $i$ маршруте, руб.; $C$ – стоимость перевозимого груза, руб.

Один килограмм тайского манго составляет 1499 руб., тогда стоимость манго в отправке равняется 347 297 314 руб.

Таким образом, получаем следующие показатели рентабельности на маршрутах:

$$R_1 = \frac{37918533\,руб}{347297314\,руб} = 0{,}109,$$

$$R_2 = \frac{15790306\,руб}{347297314\,руб} = 0{,}0454,$$

$$R_3 = \frac{15615919\,руб}{347297314\,руб} = 0{,}0449,$$

$$R_4 = \frac{7479959\,руб}{347297314\,руб} = 0{,}022.$$

Результаты сравнения маршрутов по показателям стоимости и времени представлены в табл. 8 [14].

## Анализ показателей перевозки на маршрутах

Анализ данных таблицы показывает, что наиболее дорогим, но быстрым является маршрут №1 смешанной перевозки автомобильным и воздушным транспортом. Маршруты № 2 (железнодорожный транспорт) и маршрут № 3 смешанной перевозки морским и железнодорожным транспортом имеют, сравнимо, одинаковую стоимость и время перевозки. Самое дешевое и долгосрочное направление (немного отстающее по времени от комбинированной железнодорожно-морской перевозки) – маршрут № 4 смешанной перевозки морским и автомобильным транспортом.

Маршрут № 2 (железнодорожный транспорт) в 2,11 раза дороже, в 1,3 раза быстрее и маршрут № 3 (морской и железнодорожный транспорт) в 2,08 раза дороже, 1,08 раз быстрее, чем маршрут № 4 (морской автомобильный транспорт). Комбинированное воздушно-автомобильное (маршрут № 1) направление в 5 раз дороже и в 14,6 раз быстрее, чем автомобильно-морской маршрут № 4.

Если в качестве критерия выбирать минимальное время транспортировки груза, то вариант смешанной перевозки (до аэропорта Суварнабхуми в Таиланде в рефрижераторном полуприцепе, затем до аэропорта Санкт-Петербург воздушным транспортом) по маршруту № 1 наиболее подходящий под это условие.

Так как маршруты № 2–4 имеют приблизительно одно и то же врея доставки, то, выбирая в качестве критерия минимальную оплату транспортировки груза, наиболее выгодным является вариант смешанной перевозки (от порта Лаем Чабанг до порта Новороссийск морским транспортом, затем автомобильным транспортом в рефрижераторных контейнерах) по маршруту № 4.

## Заключение

В статье описываются экзотический фрукт-манго, его транспортные характеристики, способы маркировки. Также выбран подвижной состав на воздушном, железнодорожном, автомобильном и морском транспорте и представлены маршруты транспортировки.

На первом маршруте смешанная перевозка выполнялась в рефрижераторных полуприцепах Тонар-97862 с использованием седельных тягачей Scania CNGG340 LA 4×2 MNA на автомобильном транспорте и в авиационных контейнерах модели LD-9 на Boeing 777 Freighter авиационным транспортом, ее стоимость 37 918 533 руб. и время доставки 1 сут. и 13 ч.

На втором маршруте прямая железнодорожная перевозка выполнялась в рефрижераторных вагонах повышенной вместимости для узкоколейной железной дороги модели Habis-6/8 (Trapo) и рефрижераторных вагонах автономных модели 16-5213, ее стоимость 15 790 306 руб. и время доставки 17 сут. и 7 ч.

На третьем маршруте смешанная перевозка выполнялась в 40-футовых рефрижераторных контейнерах морским транспортом на контейнеровозе «TSBANGKOK» и железнодорожным

транспортом на платформах для рефконтейнеров модели 13-401М, ее стоимость 15 615 919 руб. и время доставки 20 сут. и 21 ч.

На четвертом маршруте смешанная перевозка выполнялась в 40-футовых рефрижераторных контейнерах морским транспортом на контейнеровозе «TSBANGKOK» и автомобильным транспортом на полуприцепах Kögel S24-2 SWCT 24P 130AV 40 с импользованием седельных тягачей Scania CNGG340 LA 4x2 MNA.

В результате с помощью полученных расчетных данных делаем вывод, что экономически выгодым является смешанный маршрут перевозки № 4 (от порта Лаем Чабанг до порта Новороссийск морским транспортом, затем автомобильным транспортом в рефрижераторных контейнерах).

**Библиографический список**

1. ГОСТ 33882-2016. Межгосударственный стандарт. Плоды манго свежие. Технические условия.

2. РД 31.11.21.18-96 «Правила перевозки грузов в контейнерах морским транспортом».

3. Вагон.by. Сайт о вагонном парке и вагонном хозяйстве. URL: https://yandex.ru/search/?text=vagon.bylr=98546clid=9403src=suggest_B (дата обращения: 18.11.2021).

4. Вагоны повышенной емкости: узкая колея. URL: https://tgl.by/informacziya/spravochnik/vagonyi-povyishennoj-yomkosti- (uzkaya-koleya).html (дата обращения: 18.11.2021).

5. Полуприцеп контейнеровоз KÖGEL SWCT 24 40 port. URL: https://sanktpeterburg.flagma.ru/polupricep-konteynerovoz-kogel-swct-24-40-o3865771.html (дата обращения: 20.11.2021).

6. Полуприцепы Тонар. Официальный дилер! Глобал Трак Сейлс. URL: https://tonar-gts.ru/?utm_source=yandexutm_medium=networkutm_term=полуприцеп %20рефрижератор %20тонаputm_content={creative}utm_campaign=tonarcm_id=67848926_4754894872_11431951169_35081149952__none_search_type1_no_desktop_premium_2yclid=7274788911633191136 (дата обращения: 20.11.2021).

7. Грузовик пресс. URL: http://www.gruzovikpress.ru/article/12404-sedelniy-tyagach-scania-cng-g340-la-4x2-mna-na-gazomotornom-toplive-alternativnaya-biznes-model/ (дата обращения: 20.11.2021).

8. Самолет Boeing 777. Технические характеристики. URL: https://ria.ru/20140717/1016431337.html (дата обращения: 21.11.2021).

9. ГОСТ 14192-96. Маркировка грузов. М.: Стандартинформ, 2011. 87 с.

10. Расчет тонно-километров онлайн калькулятор. URL: https://www.center-pss.ru/math/tonno-kilometri.htm (дата обращения: 24.11.2021).

11. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозки грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые Российскими железными дорогами (Тарифное руководство № 1). Ч. 1, 2. М., 2003 (с изменениями на 31 января 2017 года).

12. Единый транзитный тариф. ЕТТ. Комитет ОСЖД. Варшава. Действует с 01.07.1991 (с изменениями и дополнениями на 08.09.2020). 108 с.

13. Международный фрахтовый брокер – сервисы для транспортных компаний, ставки фрахта, трекинг контейнеров, контейнерные перевозки. URL: https://www.searates.com (дата обращения: 25.11.2021).

14. *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.

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**УДК 629.7.05** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-123**

***В. А. Авдеев****
*кандидат технических наук, доцент*
***В. П. Семенова****
*магистрант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЯ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В АЭРОПОРТУ

*В статье рассматриваются вопросы построения комплексной системы технического зрения для обеспечения руления воздушного судна на территории аэродрома. На основе анализа существующих проблем при рулении воздушного судна предлагается ассистирующая комплексная система ориентации воздушного судна на аэродроме, которая направлена на обеспечение экипажа полным визуальным обзором пространства за бортом и повышение авиационной безопасности в неблагоприятных погодных условиях.*
***Ключевые слова:*** *воздушное судно, руление, система технического зрения.*

***V. A. Avdeev****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***V. P. Semenova****
*Postgraduate Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# JUSTIFICATION OF THE GUISE OF THE OBSTACLE RECOGNITION SYSTEM WHEN MANEUVERING AN AIRCRAFT AT THE AIRPORT

*The article deals with the questions of aircraft taxiing on the territory of the aerodrome. Based on the analysis of problems during aircraft taxiing, an assisting complex aircraft orientation system at the aerodrome is proposed, which is aimed at providing the crew with a complete visual view of the space overboard and increasing aviation safety in adverse weather conditions.*
***Keywords:*** *aircraft, taxiing, technical vision system.*

Для любого воздушного судна процесс руления по взлетно-посадочной полосе является маневром, сопряженным с повышенной сложностью и опасностью столкновения с различными препятствиями, прежде всего, из-за ограниченности видимости пилотом окружающей обстановки. Наиболее актуальна данная проблема для больших самолетов в крупных аэропортах. Статистика аварийных ситуаций в аэропортах различного уровня, показывает, что, не смотря на огромное количество ассистирующих систем, процесс маневрирования самолета на земле требует внедрения новых технологий, обеспечивающих безопасность передвижения [1], [2].

Одной из таких технологий может служить система технического зрения (СТЗ) с автоматическим распознаванием препятствий в любых условиях метеобстановки. Построение подобной системы, возможно только с использованием локационных датчиков, работающих в различных диапазонах частот, объединенных одной системой распознавания, синхронизации, позиционирования и принятия решений. Наиболее перспективным является объединение камер видимого и инфракрасного диапазона с лидаром и активным радаром. Примеры подобных датчиков, которые могут быть объединены в единую систему технического зрения приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в табл. 1 показывает, что объединение подобных датчиков в единую систему технического зрения позволит обеспечить обнаружение препятствий любого размера и в любых погодных условиях [3].

Система технического зрения и обнаружения препятствий, как система, реализующая функ-

*Таблица 1*

**Характеристики датчиков комплексной СТЗ**

| Лазерные сканирующие системы | | | |
|---|---|---|---|
| Название | Производитель | Масса | Характеристики |
| RIEGL VQ-780 II-S | RIEGL, Австрия | 20 кг | Минимальный диапазон: 100 м<br>Точность: 20 мм<br>Частота повторения лазерных импульсов: до 2 МГц<br>Максимальная скорость сканирования: 1 330 000 изм./сек |
| Камера видимого диапазона | | | |
| Название | Производитель | Масса | Характеристики |
| DJI Zenmuse X4S | DJI, Китай | 253 г | FOV 84 °<br>Диапазон рабочих температур:<br>от –10 до 40 °C |
| Zenmuse X5S | DJI, Китай | 461 г | FOV 72 °<br>Диапазон рабочих температур:<br>от –10 до 40 °C |
| DJI Zenmuse Z30 | DJI, Китай | 556 г | FOV 63,7 °<br>Диапазон рабочих температур: от –10 до +45 °C |
| Hikvision DS-2TD2617-3/PA | Hikvision, Китай | 1,76 кг | Максимальный угол обзора: 50 °, 84 °<br>Диапазон рабочих температур: от –40 до 65 °C |
| Beward B89L2-5230Z40 | Beward, Россия | 8,3 кг | Максимальный угол обзора: 40 °<br>Рабочий диапазон температур: от –50 до 50 °C |
| ИК-камеры | | | |
| Название | Производитель | Масса | Характеристики |
| Камера коротковолнового ИК-диапазона спектра со сменной оптикой | Швабе, Россия | 600 г | Формат матрицы фоточувствительных элементов: 320×256<br>Спектральный диапазон: 0,9–1,7мкм<br>Частота кадров: 50 Гц |
| Инфракрасная камера PIRATE | Eurofirst консорциум Италии, Великобретании Испании | | Спектральный диапазон (два): 3–5 мкм и 8–11 мкм |
| Малогабаритные радары | | | |
| Название | Производитель | Масса | Характеристики |
| AirMaster C | Компания: Thales, Франция | менее 20 кг | Охват видимости: от 120 до 360 ° |
| РЛС обеспечения посадки W-диапазона «Видимость-2000» | Производство: АО «НПП «Радар ммс», Россия | не более 25 кг | Дальность обнаружения в простых и сложных метеоусловиях:<br>– впп: от 3 до 6 км<br>– инфраструктура аэропорта: от 6 до 8 км<br>– авиатехника на земле: от 4 до 6 км<br>– люди: 0,5 до 1 км<br>– неровности рельефа: от 2 до 4 км |
| Бортовой радар с синтезированной апертурой MetaSAR-C | Компания Metasensing, Нидерланды | менее 18 кг | Ширина луча (азимут): 10 °<br>Угол возвышения: 38 ° |

ции измерений, передачи-приема измерений, вычислений на основе оценок измеряемых величин, имеет распределенную по уровням и элементам одного уровня информационную структуру.

Структурная схема подобной системы может быть представлена набором датчиков оценки обстановки, связанных общей системой синхронизации и позиционирования. Пример такой схемы приведен на рис. 1.

На схеме цветом дифференцированы три типа источников информации:

Данные о характеристиках движения (относительного положения и скорости) – как мгновенные значения импульса объекта управления представлены в виде потока дискретных сообщений с выхода соответствующих датчиков: датчика скорости и датчика пути, установленных на воздушном судне.

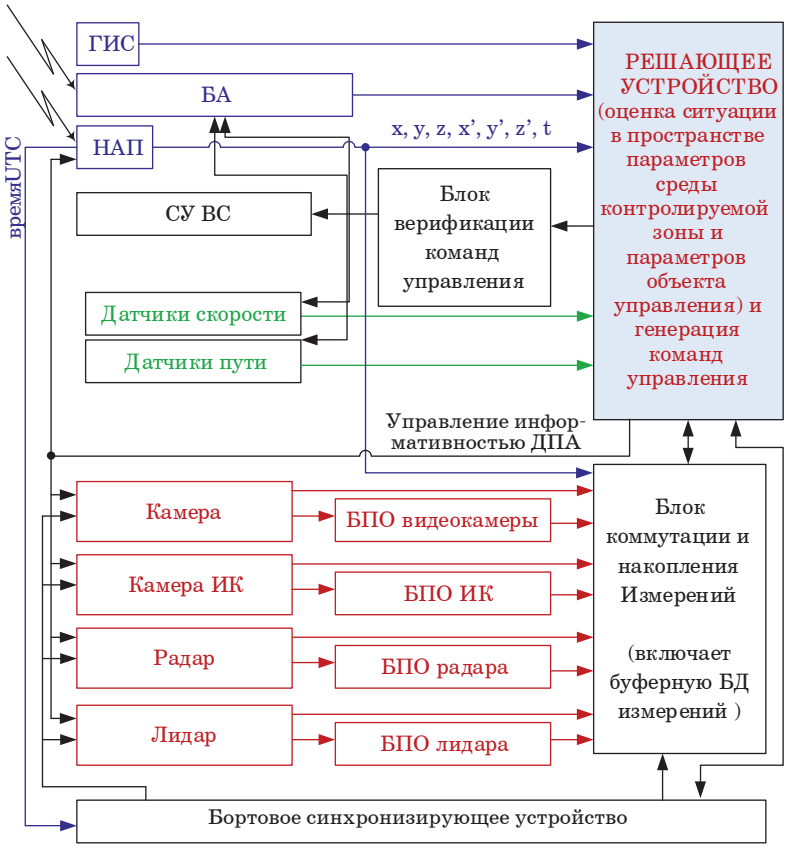



*Рис. 1. Структурная схема системы распознавания препятствий при маневрирование воздушного судна в аэропорту*

Данные о фоноцелевой обстановке на маршруте движения объекта управления представлены блоком, содержащем в памяти данные электронных планов геоинформационных систем (ГИС) (например, план аэропорта, объекты инфраструктуры района маневрирования, и др.) а также бортовой аппаратурой (БА) в которой заложен маневр в аэропорту, с выхода которых поступают данные о программе движения. Данные о траектории и местоположении объекта управления формирует бортовая навигационная аппаратура потребителя (НАП).

Датчики контролируемой зоны представлены камерой видимого диапазона, камерой инфракрасного диапазона, радиолокатором и лидаром. На схеме присутствуют связи сенсоров с блоком коммутации и накопления результатов измерений как через блоки предварительной обработки (БПО), осуществляющие параллельную предварительную классификацию сцен в картинной плоскости датчика, так и напрямую.

Последнее позволяет реализовать сигнализаторы сцен (обнаружители препятствий), когда по необработанным выходным данным сенсора однозначно регистрируется событие, переводящее результат классификации событий в контролируемой зоне в класс «наличия препятствия». Например, запрещающий транспарант может требовать экстренного или служебного торможения. Все датчики считаются откалиброванными с известными тарировочными характеристиками, а результаты телесигнализации, телеизмерений и предварительной обработки телеизмерений, записываемые в таблицы базы данных (БД) измерений – привязаны к секундной метке.

Приборы в составе датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА) на выходе могут предоставлять данные в формате RS-485, который обеспечивает передачу данных со скоростью до 10 Мбит/с [4]. Протоколы обмена в большинстве интерфейсов приборов ДПА работают по принципу «ведущий-ведомый». Одно устройство на магистрали является ведущим (master) и инициирует обмен посылкой запросов подчиненным устройствам (slave), которые различаются логическими адресами (например, как в протоколе Modbus RTU). Сигналы интерфейса RS-485 передаются дифференциальными перепадами напряжения величиной (0,2…8) В, что обеспечивает высокую помехоустойчивость. Кроме того, ин-

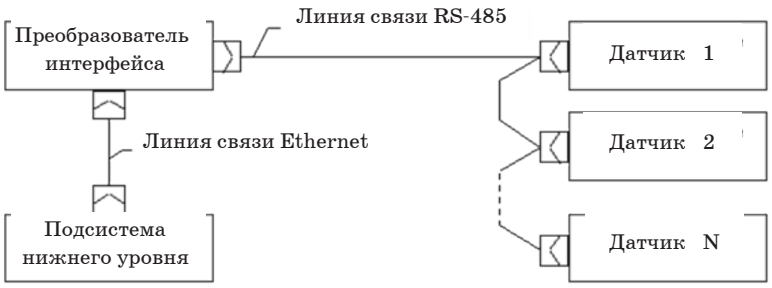



*Рис. 2. Вариант подключения ДПА в системе технического зрения*

терфейс RS-485 позволяет создавать сети путем параллельного подключения многих устройств к одной физической линии, так называемая мультиплексная шин (рис. 2) [5].

Конвертер в составе бортового оборудования обеспечивает полностью прозрачную приемопередачу (обмен) данных в любом направлении.

Бортовое синхронизирующее устройство совместно с блоком коммутации и накопления измерений предназначено для упорядочивания измерений по времени в массивах данных, реализуя технологии обработки окон наблюдения и витрины данных (асинхронное накопление измерений – синхронный опрос). Фактически бортовое синхронизирующее устройство может быть реализовано в виде переменной (указателя), содержащей ссылку на секундную метку с выхода НАП, а блок коммутации и накопления измерений реализует функцию оперативного запоминающего устройства для четырех и более независимых регистров датчиков.

Решающее устройство реализует комплексную обработку измерительной информации и фактографических данных с целью классификации всего разнообразия сцен контролируемой зоны в конечное множество классов ситуаций. Связь решающего устройства с бортовым синхронизирующим устройством и блоком коммутации и накопления измерений – двунаправленная, с целью коррекции процедуры опроса ДПА в режиме слежения за потенциально опасными объектами в контролируемой зоне.

Блок верификации команд (аналог системы *Responsibility-Sensitive Safety* (RSS) представляется элементом резервирования в схеме надежности «*распознавание→ управление*». Интенсивный анализ большого объема данных о текущей обстановке при большом скоплении посторонних объектов в контролируемой зоне может стать невыполнимым в условиях маневрирования ВС. Для обеспечения надежности каждое действие СТЗ может проверятся в реальном режиме времени на соответствие простым математическим формулам или логическим условиям, например, формулам вычисления безопасной дистанции до впереди идущего транспортного средства.

**Библиографический список**

1. Северо-Западное межрегиональное территориальное управление воздушного транспорта Федерального агентства воздушного транспорта. Отдел инспекции по безопасности полетов. Информационный бюллетень состояния безопасности полетов. № 7. Июль 2021 года. 11 с.

2. Инструкция по организации движения спецтранспорта и средств механизации на гражданских аэродромах Российской Федерации. МИНТРАНС России. 2006. 56 с.

3. Будущее сильной России – в высоких технологиях! URL: https://radar-mms.com/product/radiolokatsionnye-sistemy/bortovye-radiolokatsionnye-stantsii/rls-obespecheniya-posadki-w-diapazona-vidimost-2000 (дата обращения: 26.11.2021).

4. BBC News. Русская служба. URL: https://www.bbc.com/russian/international/2014/10/141023_vnukovo_margerie_iac_results (дата обращения: 20.10.2021).

5. *Грачев В. В., Кейн В. М.* Радиотехнические средства управления воздушным движением: учеб. пособие для вузов гражданской авиации. М.: Транспорт, 1975. 344 с.

**УДК 629.783** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-127**

***Ю. А. Кузьмичев****
*кандидат технических наук, доцент*
***М. Д. Пецевич****
*магистрант*
***Е. К. Тарасова****
*магистрант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ВАРИАНТЫ АВТОПОДСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО ФИЛЬТРА В СИСТЕМЕ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННОЙ

*Рассмотрено применение резонансного фильтра, который является элементом алгоритма управления в системе угловой стабилизации космического аппарата. Предложен алгоритм автоподстройки частоты резонансного фильтра для подавления упругих тонов колебаний корпуса космического аппарата.*
***Ключевые слова:*** *космический аппарат, резонансный фильтр, система угловой стабилизации, автоподстройка.*

***Y. A. Kuzmichev****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***M. D. Petsevich****
*Postgraduate Student*
***E. K. Tarasova****
*Postgraduate Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# OPTIONS FOR AUTOMATIC ADJUSTMENT OF RESONANT FILTER PARAMETERS IN THE ANGULAR STABILIZATION SYSTEM OF A SPACECRAFT WITH A LARGE ANTENNA

*The application of a resonant filter, which is an element of the control algorithm in the angular stabilization system of the spacecraft, is considered. An algorithm for automatic frequency tuning of a resonant filter to suppress elastic tones of vibrations of the spacecraft body is proposed.*
***Keywords:*** *spacecraft, resonant filter, angular stabilization system, auto-tuning.*

## Введение

В настоящее время в состав аппаратуры космических аппаратов (КА) входят крупногабаритные антенны. Одним из направлений развития КА является увеличение массы и габаритов выносных элементов КА (солнечные батареи, выдвижные штанги, антенны и т. п.). Вышеперечисленные элементы в связи с ограничениями по массе имеют тонкостенные оболочки сетки и пленки, а также складную конструкцию, в которой широко используются стержни малого поперечного сечения. Примером подобных конструкций могут являться крупногабаритные антенны спутников связи, диаметр которых может достигать 100 м. Различные варианты таких антенн представлены на рис. 1 [1].

Возникающие упругие колебания при переориентации КА приводят к ухудшению характеристик переходного процесса (снижению быстродействия и уменьшению запасов устойчивости, вплоть до потери устойчивости).

В [2] предлагается способ подавления упругих колебаний корпуса КА с применением резонансных фильтров (РзФ) для выделения информации о параметрах упругих колебаний с последующим использованием этой информации для их подавления. Для реализации предложенного метода необходима априорная информация о значении частоты тона, оказывающего наибольшее влияние на функционирова-

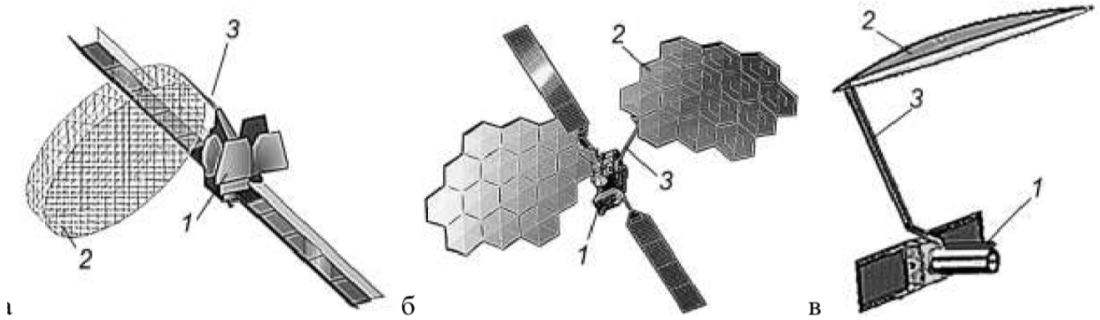



*Рис. 1. Примеры крепления крупногабаритных рефлекторов к корпусу КА: а – Thuraya; б – Kiku; в – NISAR; 1 – корпус КА; 2 – рефлектор; 3 – балка*

ние системы угловой стабилизации. На самом деле существует некоторое различие между действительным и истинным значениями частоты РзФ и частоты упругого тона. Исследованию влияния этих различий частот на динамические характеристики системы стабилизации КА и посвящена работа.

## Постановка задачи

Реализовать РзФ на борту КА можно либо с помощью пассивных элементов (R, L, C – преобразователей), либо с помощью алгоритмов в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) колебательного звена второго порядка, передаточная функция которого представлена следующей зависимостью [3]:

$$W(p) = \frac{K}{p^2 + t_1 p + t_2}, \qquad (1)$$

где $K$ – коэффициент передачи РзФ; $t_1$ – коэффициент собственного демпфирования резонансного фильтра; $t_2$ – собственная частота упругого тона.

При изучении свойств РзФ в процессе исследования была разработана математическая модель, представленная на рис. 2 в виде структурной схемы.

Четыре синусоидальных сигнала с генераторов представляют собой модели тонов упругих колебаний корпуса КА. Задачей резонансного фильтра является выделение из суммарного сигнала параметров, характеризующих колебания заданного тона, на которую настроен данный РзФ. Результаты моделирования математической модели РзФ представлены на рис. 3.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: sum – входной сигнал, представляющий сумму четырех гармонических сигналов с разной частотой и амплитудой; RF – сигнал, выделяемый РзФ.

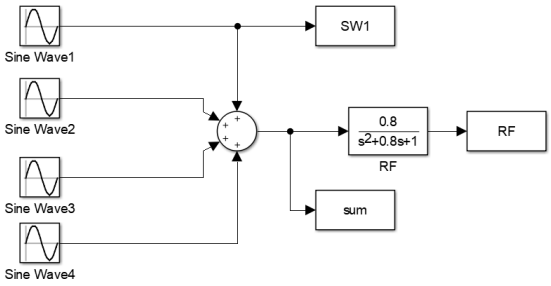



*Рис. 2. Структурная схема РзФ*

Входной сигнал соответствует измеренному сигналу, поступающему от измерительных устройств системы стабилизации КА, и имеет сложную форму. РзФ позволяет выделить сигнал, соответствующий заданному тону колебаний, и использовать его в алгоритме управления (АУ) [2].

На рис. 4 представлены выходные сигналы РзФ (RF) и выходные сигналы упругого тона колебаний (SW1).

При совпадении частот РзФ и упругого тона сигналы по форме и частоте совпадают, но присутствует запаздывание. При несовпадении частот изменяется амплитуда выходного сигнала. Чем выше рассогласование частот, тем сильнее сдвиг фазы сигнала и меньше значение амплитуды выходного сигнала, как следствие – негативное влияние на качества функционирования системы стабилизации КА. Кроме того, происходит изменение формы сигнала. Это приведет к снижению быстродействия, а в некоторых случаях и к потере устойчивости системы стабилизации КА.

Чтобы уменьшить влияние разности частот РзФ и упругого тона, предлагается перед осуществлением разворота КА проводить кали-

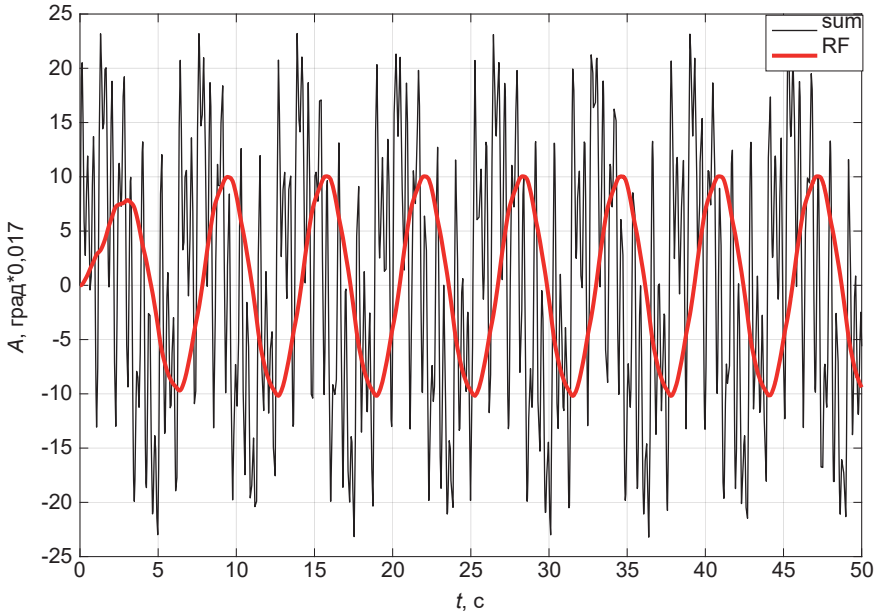



*Рис. 3. Входной и выходной сигнал РзФ*

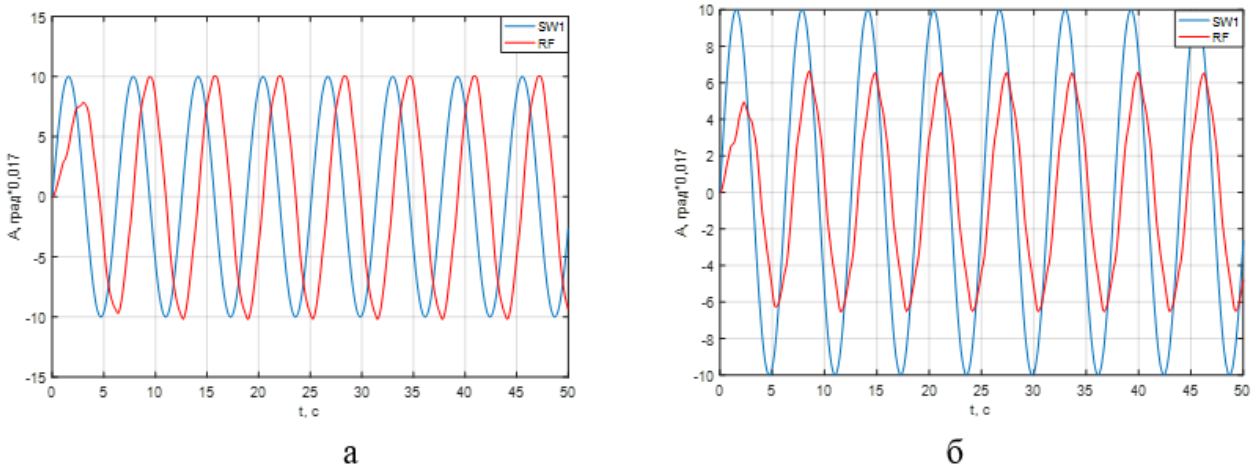



*Рис. 4. Графики гармонического сигнала SW1 и сигнала RF, выделенного РФ при: а – совпадении частот РзФ и упругого тона колебаний; б – при наличии разности частот РзФ и упругого тона колебаний*

бровку резонансного фильтра, разработав алгоритм автоподстройки частоты. На основании известной зависимости изменения амплитуды РзФ от смещения частоты РзФ можно реализовать следующую последовательность действий:

– определить начальное значение частоты РзФ и подать на объект управления тестовый сигнал;

– измерить значение амплитуды выходного сигнала;

– реализовать смещение частоты РзФ на некоторое значение $\Delta\omega$ и определить знак приращения амплитуды;

– в случае увеличения значения амплитуды на выходе РзФ продолжить изменение частоты;

– в случае уменьшения значения амплитуды отменить предыдущее изменение частоты и изменить частоту на значение $\frac{1}{2}\Delta\omega$;

– повторять пункты 3÷5 до тех пор, пока амплитуда на выходе РзФ не достигнет экстремума

Предложенный алгоритм автоподстройки является может быть реализован в БЦВМ КА.

Также определить значение амплитуды можно и другим вариантом. При решении задачи подстройки частоты нередко полагают, что

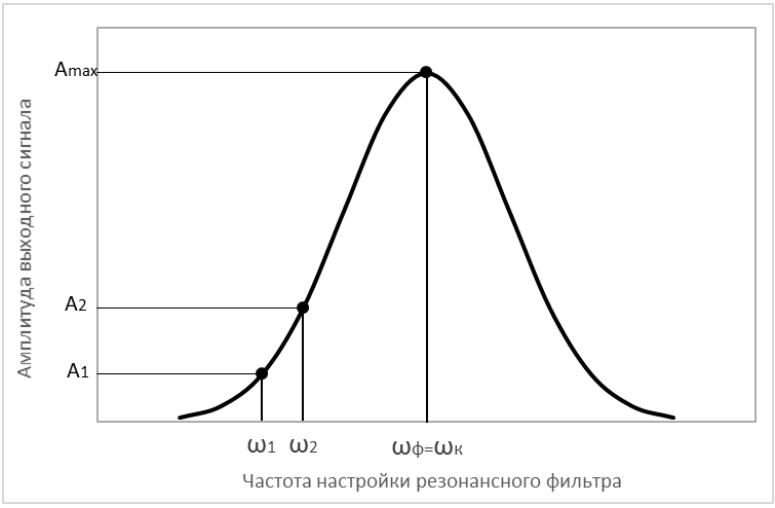



*Рис. 5. Зависимость изменения амплитуды РзФ от смещения частоты РзФ*

зависимость смещения частоты РзФ и амплитуды выходного сигнала представляет собой функцию нормального распределения [4]. Данная функция описывается следующим уравнением:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (2)$$

где σ – дисперсия; μ – математическое ожидание.

Вместо того, чтобы последовательно изменять значение частоты $\Delta_\omega$ до тех пор, пока функция не достигнет экстремума, подадим два тестовых сигнала и измерим значения амплитуд выходных сигналов. На основании полученных результатов определяем точку экстремума, как показано на рис. 5.

Максимальная амплитуда $A_{max}$ выходного сигнала будет соответствовать равенству частот упругого тона и РзФ.

## Заключение

Рассмотренный метод актуален для построения СУС КА, для которой использование методов амплитудной и фазовой стабилизации невозможно в силу близости частот колебаний корпуса и первого тона. Применение РзФ позволяет выделить из измеренного сигнала информацию о параметрах упругих колебаний заданного тона для формирования управляющих воздействий в системе стабилизации КА.

Исследование применения РзФ в СУС КА показало, что для улучшения качества переходного процесса при переориентации КА в одной плоскости необходимо совпадение частот РзФ и упругого тона. Необходимым условием применения разработанных алгоритмов является наличие априорных данных о значении частоты подавляемого тона упругих колебаний. Предложенный вариант автоподстройки частоты РзФ заключается либо в постепенном изменении частоты РзФ до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала не достигнет максимального значения, либо определение экстремума путем экстраполяции по двум тестовым сигналам с учетом известной зависимости амплитуды выходного сигнала от разности частот РзФ и упругого тона.

### Библиографический список

1. *Биюшкина Т. С., Щеглов Г. А.* Анализ способов демпфирования колебаний крупногабаритных конструкций КА в магнитном поле земли // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2016. № 3. С. 11–25.

2. *Пецевич М. Д., Тарасова Е. К., Кузьмичев Ю. А.* Построение системы стабилизации космического аппарата с крупногабаритной антенной // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Вторая Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2021 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2021. С. 237–239.

3. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория автоматического управления. СПб.: Профессия, 2004. 752 с.

4. *Степанов О. А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 1: Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор». 2009. 496 с.

**УДК: 629.783** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-131**

***А. Л. Кунтуров****
*кандидат военных наук*
***С. А. Кунтуров****
*ассистент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ГОТОВНОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЮ

*В настоящей статье рассмотрен подход к оцениванию готовности орбитальной группировки КА к выполнению задач по предназначению, рассчитаны статистические оценки показателей безотказности, оценена взаимосвязь результатов, полученных при расчете статистических оценок показателей безотказности и коэффициента совокупного готовности, подтверждена гипотеза о взаимосвязи коэффициента совокупной готовности и величины вероятности безотказной работы исследуемых объектов.*
***Ключевые слова:*** *космический аппарат, орбитальная группировка, коэффициент совокупной готовности.*

***A. L. Kunturov****
*PhD of Military Sc.*
***S. A. Kunturov****
*Assistant*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# AN APPROACH TO ASSESSING THE READINESS OF AN ORBITAL CONSTELLATION OF SPACECRAFT TO PERFORM TASKS AS INTENDED

*In this article, an approach to assessing the readiness of a spacecraft orbital grouping to perform tasks as intended is considered, statistical estimates of the reliability indicators are calculated, the relationship between the results of calculating statistical estimates of the reliability indicators and the aggregate availability factor is evaluated, the hypothesis about the relationship between the aggregate availability factor and the probability of failure-free operation of the objects under study is confirmed.*
***Keywords:*** *spacecraft, orbital constellation, aggregate availability factor.*

Готовность к выполнению задач по предназначению космического аппарата (КА) и орбитальной группировки (ОГ) связана с безотказностью работы целого комплекса элементов КА [1], [2], [7]. С целью определения показателей безотказности исследуемых объектов, используя статистические данные за определенный промежуток времени и строя зависимости показателей безотказности во времени, можно на основе представленных статистических данных произвести расчет и осуществить анализ показателей надежности серии исследуемых объектов [3], [4].

Во временном интервале от 0 до $t$ вероятность безотказной работы исследуемого объекта является наиболее универсальным показателем эксплуатационной надежности объекта [5], [6]. Вероятность безотказной работы зависит от времени работы объекта, причем:

$$P(0) = 1 \text{ и } P(\infty) = 0; F(t) = P(T < t)$$

Это равенство, выражает вероятность того, что время исправной работы $T$ будет меньше рассматриваемого времени $t$.

$F(t) = Q(t)$ – определяет вероятность отказа объекта за время $t$, $P(t) = 1 - Q(t)$.

Следовательно,

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad P(t) = \int_0^\infty f(t)dt;$$

вероятность безотказной работы будет уменьшается при увеличении времени работы.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы определяется по формуле:

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N},$$

*Таблица 1*

**Результаты расчета статистических оценок показателей безотказности**

| Временной интервал Δt, час | Количество отказов на за данный интервал $\Delta n(t)$ | Количество элементов и систем КА без отказов на конец периода $N(t)$ | Количество элементов и систем КА с отказами на конец периода | Вероятность безотказной работы $P(t)$ | Вероятность отказа $Q(t)$ | Плотность вероятности отказов $f(t)$ | Интенсивность отказов $\lambda(t)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | из 20 | | | | | |
| 1.0–720 | 3 | 19 | 1 | 0,95 | 0,05 | 0,00021 | 0,00022 |
| 2.721–1440 | 3 | 19 | 1 | 0,95 | 0,05 | 0,00021 | 0,00022 |
| 3.1441–2160 | 4 | 18 | 2 | 0,90 | 0,10 | 0,00028 | 0,00031 |
| 4.2161–2880 | 5 | 18 | 2 | 0,90 | 0,10 | 0,00035 | 0,00039 |
| 5.2881–3600 | 6 | 17 | 3 | 0,85 | 0,15 | 0,00042 | 0,00049 |
| 6.3601–4320 | 8 | 17 | 4 | 0,85 | 0,15 | 0,00056 | 0,00065 |
| 7.4321–5040 | 9 | 17 | 4 | 0,85 | 0,15 | 0,00063 | 0,00074 |
| 8.5041–5760 | 11 | 16 | 6 | 0,80 | 0,20 | 0,00076 | 0,00095 |
| 9.5761–6480 | 12 | 16 | 6 | 0,80 | 0,20 | 0,00083 | 0,00104 |
| 10.6481–7200 | 12 | 16 | 7 | 0,80 | 0,20 | 0,00083 | 0,00104 |

где $N$ – число исследуемых объектов, которые в начальный момент времени являются работоспособными; $n(t)$ – число исследуемых объектов, которые являются отказавшими на временном интервале от 0 до $t$.

При проведении испытания объектов за 7200 часов – временной период, каждые 720 часов осуществлялось определение количества отказов элементов и систем космического аппарата (рассматривалось 20 элементов и систем). При определении показателей эксплуатационной надежности космического аппарата вычислялись:

I. Статистические оценки распределения вероятностей отказа $Q(t)$ и безотказной работы $P(t)$ во времени.

II. Изменение плотности вероятности отказов $f(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$ по времени.

III. Отражение полученных результатов на графике.

I. Количество элементов и систем КА не имевших отказов на конец каждого временного периода определим по формуле:

$$N(t) = N - n(t).$$

В конце каждого временного периода рассчитывалась статистическая оценка вероятности безотказной работы:

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}.$$

Количество отказов на конец каждого временного периода:

$$n(t_{i+1}) = n(t) + \Delta n(t).$$

Статистическая оценка вероятности отказа на конец каждого временного периода:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N}.$$

II. Статистическая оценка плотности вероятности отказов рассчитана по формуле:

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t}.$$

Величина интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N - n(t))\Delta t}.$$

III. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Коэффициент совокупной готовности

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^{10} G_{ij}}{10}, i = \overline{1,22},$$

$i$-го КА может быть вычислен на основе предложенной методики оценки совокупной готовности [6] КА к выполнению задач по предназначению во временные интервалы $\Delta t_j$ :

$$\Delta t_1 = [0 - 720], \ \Delta t_2 = [721 - 1440], \ \ldots$$

$$\Delta t_{10} = [6481 - 7200].$$

При этом значения $G_{ij}$ :

$$G_{11} = 0{,}996, \ \Delta t_1 = [0 - 720];$$

$$G_{12} = 0{,}989, \ \Delta t_2 = [721 - 1440];$$

$$G_{13} = 0{,}982, \ \Delta t_3 = [1441 - 2160].$$

*Таблица 2*

**Взаимосвязь результатов расчета статистических оценок показателей безотказности и коэффициента совокупного готовности для 22 КА из состава ОГ**

| Временной интервал $\Delta t$, час | Коэффициент совокупной готовности ОГ $G_{ОГ_КА} = \frac{\sum_{i=1}^{m} G_i}{m}$ | Количество отказов за данный интервал $\Delta n\ (t)$ | Вероятность безотказной работы ОГ КА $P(t)_{ОГ_КА} = \prod_{i=1}^{m} P_i(t)$ | Вероятность отказа ОГ КА $Q(t)_{ОГ_КА}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0–720 | 0,878 | 32 | 0,362 | 0,638 |
| 721–1440 | 0,867 | 36 | 0,260 | 0,740 |
| 1441–2160 | 0,864 | 37 | 0,122 | 0,878 |
| 2161–2880 | 0,852 | 44 | 0,120 | 0,880 |
| 2881–3600 | 0,834 | 46 | 0,039 | 0,961 |
| 3601–4320 | 0,816 | 43 | 0,038 | 0,962 |
| 4321–5040 | 0,798 | 47 | 0,036 | 0,964 |
| 5041–5760 | 0,788 | 51 | 0,011 | 0,989 |
| 5761–6480 | 0,779 | 53 | 0,010 | 0,990 |
| 6481–7200 | 0,768 | 57 | 0,009 | 0,991 |

Аналогично, рассчитываются значения коэффициентов совокупной готовности для каждого КА из состава ОГ: $G_1; G_2 ... G_{22}$..

Используя полученные значения для каждого КА из состава ОГ можно оценить взаимосвязь результатов расчета статистических оценок показателей безотказности и коэффициента совокупного готовности для каждого (из $m$ = 22) КА состава ОГ (табл. 2).

Из табл. 2 видно, как изменяется суммарная величина совокупного коэффициента готовности $G$ и как изменяется $P\ (t)$ вероятность безотказной работы ОГ КА.

Таким образом, из приведенных расчетов можно заключить, что среднее значение коэффициента совокупной готовности ОГ КА является более корректным для отражения состояния ОГ, чем вычисленная вероятность ее безотказной работы.

Подтверждается гипотеза о взаимосвязи коэффициента совокупной готовности и величины вероятности безотказной работы исследуемых объектов [5], [7]. Это позволило выделить следующие интервалы сообразно критериям качества, основываясь на величине вычисленного коэффициента совокупной готовности.

**Библиографический список**

1. *Гущин В. Н.* Основы устройства космических аппаратов: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.

2. *Езерский В. В., Васильев И. А., Абдурахимов А. А.* Состояние и перспективы развития конструкции космических аппаратов: учеб. пособие. СПб.: ВКА им А.Ф. Можайского, 2012. 205 с.

3. *Романов А. В., Тестоедов Н. А.* Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов: учебник. СПб.: ФГУП КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе, 2015. 240 с.

4. *Романов А. В.* Системы обеспечения тепловых режимов герметичных отсеков и ядерных энергетических установок космических аппаратов: учебник. СПб.: ФГУП КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе, 2014. 248 с.

5. *Кунтурова Н. Б., Кунтуров С. А.* Расчет совокупного износа деталей механизмов машин // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2015. № 648. С. 153–156.

6. Теория проектирования сложных технических систем космического базирования: учебник / М. К. Сапего, Н. А. Тестоедов, В. Д. Атамасов и др. СПб.: ФГУП КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе, 2012. 560 с.

7. *Кунтуров С. А., Кунтурова Н. Б., Скорина С. Ф.* Структурная схема информационно-аналитической системы оценки надежности элементов пилотажно-навигационного оборудования аэрокосмических систем // Телекоммуникации. 2018. № 2. С. 23–27.

**УДК 629.78:004.8.032.26**

***С. Г. Бурлуцкий****
*кандидат технических наук, доцент*
***А. В. Назаров****
*доктор технических наук, профессор*
***Д. А. Бобровский****
*студент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ ОТСЧЕТОВ МНОГОМЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Описан подход к распознаванию дискретных отсчетов многомерных кривых с использованием многослойных нейронных сетей. Представлен архитектура сети с векторной функцией выхода, позволяющая распознавать шаблонные формы кривых в условиях шумов и низкочастотных искажений. Проведено сравнение достоверности методов на примере распознавания космических аппаратов по фотометрическим кривым блеска.*
***Ключевые слова:*** *многослойная нейронная сеть, многомерная экспериментальная кривая, алгоритмы распознавания.*

***S. G. Burlutsky****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***A. V. Nazarov****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***D. A. Bobrovskiy****
*Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# RECOGNITION OF THE STATES OF SYSTEMS IN THE SPACE OF SAMPLES OF MULTIDIMENSIONAL EXPERIMENTAL CURVES USING MULTILAYER NEURAL NETWORKS

*An approach to the recognition of discrete samples of multidimensional curves using multilayer neural networks is described. A network architecture with a vector output function is presented, which makes it possible to recognize patterned waveforms in conditions of noise and low-frequency distortions. Comparison of reliability of methods on the example of recognition of spacecrafts on photometric curves of gloss is carried out.*
***Keywords:*** *multilayer neural network, multidimensional experimental curve, recognition algorithms.*

При проведении исследований различных физических явлений, процессов или поведения сложных технических объектов возникает необходимость анализа экспериментальных кривых, являющихся внешним проявлением состояний систем, последовательностей событий, локализованных во времени/пространстве и недоступных для непосредственного наблюдения. Так, задачи прогнозирования регулярного и хаотического поведения нелинейных динамических систем, представляющих природные объекты (рис. 1*a*) сводится к анализу вида (класса) некоторых траекторий на плоскости или в $n$-мерном пространстве [1]. Кривые блеска (рис. 1*b*), с выхода фотометра оптико-электронной системы (ОЭС) по результатам наблюдений космических аппаратов (КА) в различных спектральных диапазонах, в совокупности характеризуют: геометрические размеры, форму, компоновку КА, оптические характеристики материалов покрытий навесных элементов, тип стабилизации КА в зависимости от фазового угла и угла места с наблюдаемой ОЭС [2]. Совокупность нескольких телеметрируемых параметров (рис. 1*c*), более полно характеризует техническое состояния бортовых систем КА, находящегося в различных, ненаблюдаемых условиях воздей-

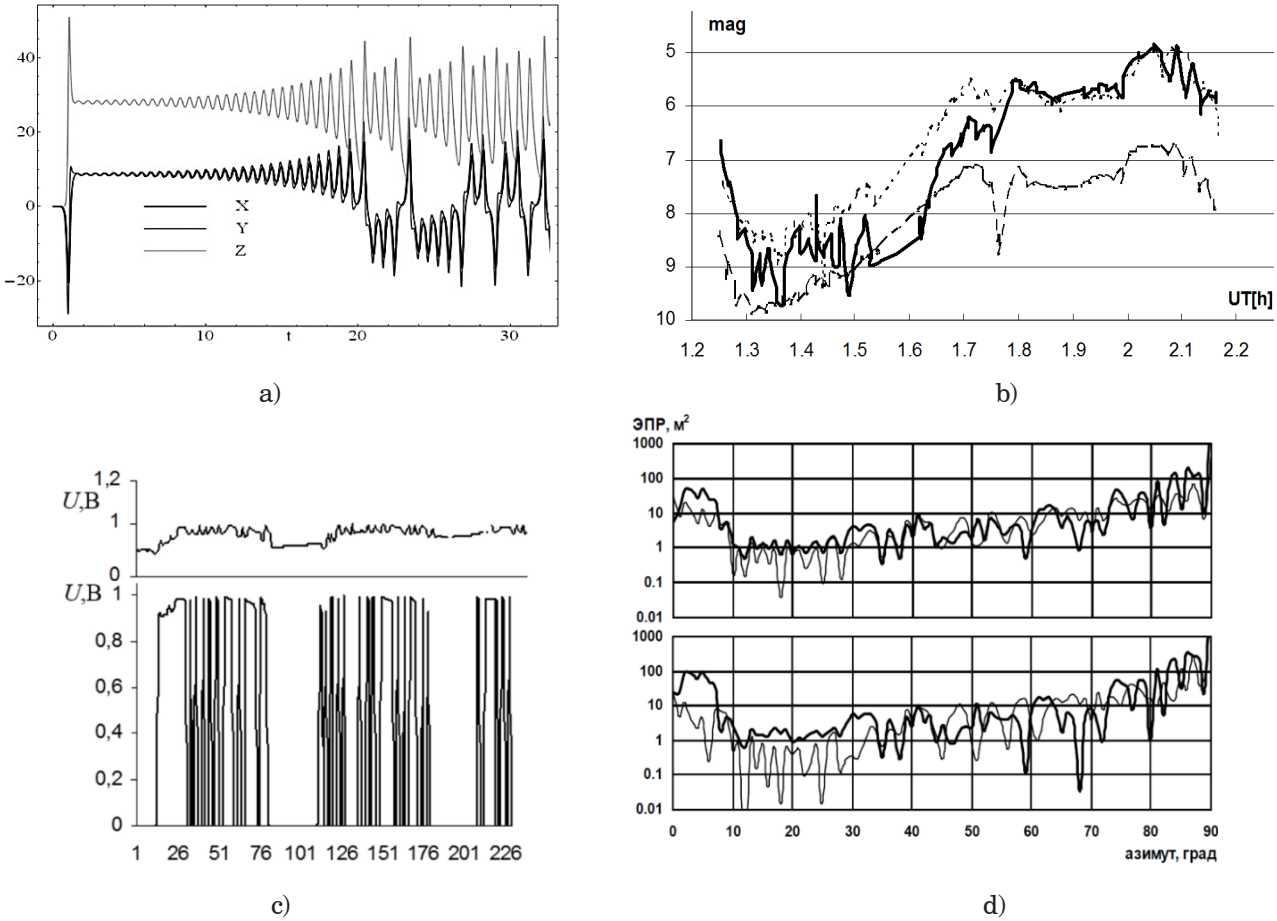



*Рис. 1. Примеры функциональных кривых, одновременно описывающих состояния одного процесса или объекта: a – временные развертки динамики системы Лоренца; b – кривые блеска КА «Интелсат 10-02» 7.10.10 после выхода из тени в фильтрах: V – сплошная линия, R ---, B – –; c – телеметрируемые параметры малого КА RS-22: напряжение бортовой сети (верхний график) и напряжение солнечной батареи; d – характерные зависимости эффективной площади рассеяния одного и того же объекта горизонтальной и вертикальной поляризации от угла наблюдения*

ствия факторов околоземного космического пространства [3]. При изучении радиофизических полей радиолокационными методами в качестве характеристики отраженного поля широко используется сечение поля обратного рассеяния, при которой экспериментальная информация фиксируется в виде характерных синхронных временных, частотных или фазовых зависимостей (рис. 1*d*) эффективной площади рассеяния $f(t,d,\varphi)$, где $d$ и $\varphi$ – некоторые параметры, отражающие размеры объекта, его форму или параметры движения объекта; $t$ – время [4]. Все примеры характеризуются общим свойством – описанием одного исследуемого процесса (объекта) множеством функционально связанных экспериментальных кривых или неизвестной вектор-функцией объекта наблюдения.

Спектр подходов к анализу плоских кривых по отдельности, с целью извлечения информации о структуре изучаемого процесса, широк: от прямого, шаблонного отождествления и фильтрации во временной области или пространствах преобразований до различных признаковых методов распознавания образов. Идея синтеза признаковых методов распознавания кривых состоит в построении отображении бесконечного многообразия значений аппроксимирующей функции в конечномерное пространство признаков, позволяющее достоверно различать элементы алфавита классов [5]. Широко распространены лингвистические методики, успешно применяющиеся для анализа кривых вариации интенсивности космических лучей, изучения связи кривых скоростей реакций с ходом химических процессов, диагностики электромеханических систем по акустическим параметрам, изучения кривых параметров в алгоритмах распознавания речи [6]–[8], и в других предметных областях. Трудность формализа-

ции этой задачи в рамках лингвистического подхода обусловлена многообразием описаний законов источников экспериментальных кривых.

Пусть каждый класс процессов и явлений из алфавита классов одновременно описывается совокупностью $m$ непрерывных функций $x_j(t)$, $j$=1, …, $m$, $t\in[0,T]$ (кривых) или совокупностью дискретных значений $\{x_j(t_i)\}$ каждой $j$-й, в общем случае нестационарной на интервале $t\in[0,T]$ кривой (или сигнала, далее по тексту синоним). Ограничиваясь некоторой максимальной частотой периодической составляющей, можно указать шаг квантования, при котором за период наблюдения $T$ непрерывная и дискретная формы представления эквивалентны относительно точности идентификации состояний процесса или явления. Рассмотрим частный алгоритм идентификации системы на основе $N$-мерного представления отсчетов дискретного представления плоских кривых. Математическим объектом, с помощью которого описывается наблюдаемая с течением времени плоская (в пространстве $\mathbf{R}^1$) или многомерная ($\mathbf{R}^n$) кривая, является временной ряд. Временной ряд многомерный, если он получен в результате наблюдения более одной характеристики одного объекта, например, кривые блеска, полученные при многопунктных синхронных базисных наблюдениях КА в разных спектральных диапазонах. В самом общем виде многомерный временной ряд представляет собой матричную запись вида:

$$S = \begin{array}{c|ccc} & t_1 & \cdots & t_N \\ \hline \bar{s}_1 & s_{11} & \cdots & s_{1N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \bar{s}_M & s_{M1} & \cdots & s_{MN} \end{array}, \qquad (1)$$

где $s_{ij} = s_i\left(t_j\right)$, $i = \overline{1,N}$, $j = 1,M$ – отсчет $j$-й кривой в $i$-й момент времени.

Важной особенностью многомерного временного ряда является то, что значения всех характеристик измеряются в один и тот же момент времени. Каждый вектор можно рассматривать как одномерный временной ряд. Ряд $x_i\left(t_j\right)$ называется регулярным, если наблюдения измеряемых величин производились через фиксированный интервал времени [5]. Для удобства описания математических операций регулярный одномерный временной ряд часто представляют в виде вектора значений, заменяя фактическое время наблюдения целочисленным индексом.

Применение многослойных нейронных сетей (НС) для распознавания отличается от классических алгоритмов множественного обнаружения отсутствием необходимости формировать презентативный шаблон, что в свою очередь, устраняет этот фактор, влияющий на достоверности идентификации образца многомерной кривой. Благодаря размерности входного слоя и большому количеству настраиваемых коэффициентов многослойные НС осуществляют нелинейное отображение множества входных форм регистрируемых кривых измеряемого процесса во множество выходных классов типов и состояний объекта наблюдения. Если обозначать $k$ – размерность кривой, то входной вектор обучающей выборки НС содержит $k*L$ отсчетов кривой, нормированных линейно (нелинейная нормировка искажает форму кривой) в интервал $s_i^{norm} \in[0,1]$:

$$s_i^{norm} = \frac{s_i - s_{i,\min}}{s_{i,\max} - s_{i,\min}}\left(b-a\right) + a, \qquad (2)$$

где $a$ и $b$ – границы нормированного диапазона ($a$ = 0, $b$ = 1).

Выходные переменные обучающей выборки характеризуют скалярную величину – индекс класса $q_t$, $t$ = 1, …, $m$, $m$ – число классов типов и состояний КА, в связи с чем нормировка/денормировка выходных векторов нецелесообразна. Таким образом, многослойная НС прямого распространения сигнала, имеет архитектуру {$kL$, $X_1$, … $X_N$, 1}, где $kL$ – размер входного слоя, $X_1$, … $X_N$ – размеры скрытых слоев (рис. 2).

В экспериментах все передаточные функции нейронов в виде гиперболического тангенса симметричны относительно точки (0,0), и их производные непрерывны:

$$f\left(x\right) = \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{e^{ax} + e^{-ax}}, \qquad (3)$$

где $a$ – параметр крутизны гиперболического тангенса; $x$ – взвешенная сумма входов нейрона.

Помимо архитектуры НС, изображенной на рис. 2, в рамках исследований предложена архитектура НС с векторной функцией (рис. 3). Особенность такого представления выходного слоя данной архитектуры НС обусловлена наличием шумов и искажений кривых, что требует использовать в выходном слое НС позиционный код вида:

$$\begin{array}{c} [-1,-1,...,1,...,-1] \\ 1, \quad 2, ..... \quad j, ... \quad ,M \end{array} \rightarrow q_j, \; j = \overline{1,M}. \qquad (4)$$

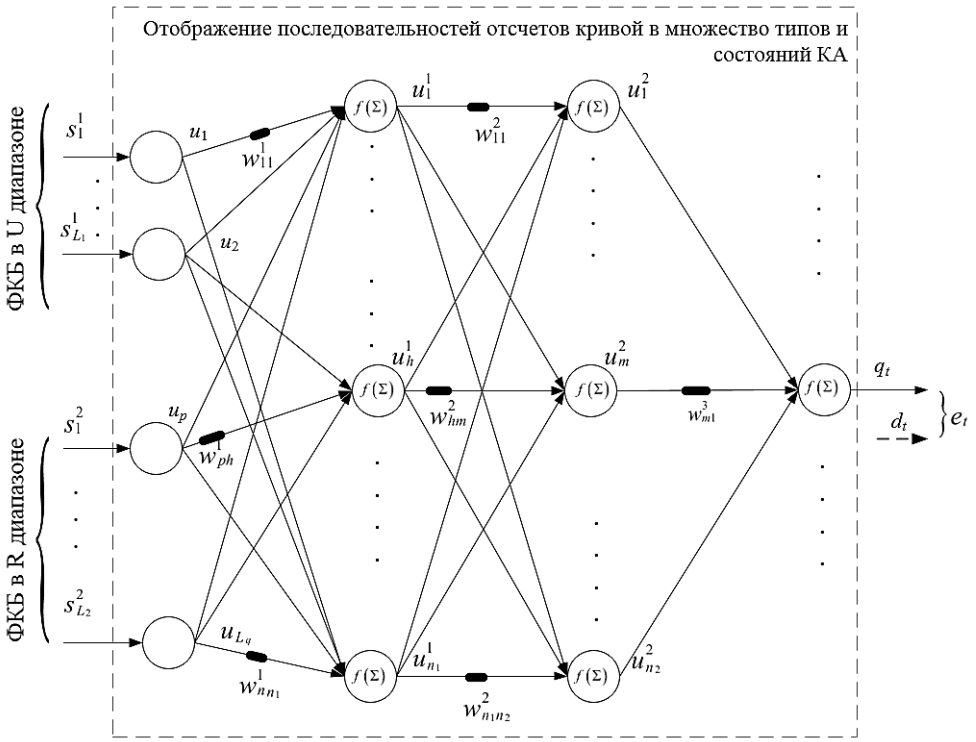



*Рис. 2. Архитектура НС для отображения последовательностей отсчетов двумерной кривой в множество типов и состояний КА со скалярной функцией выхода на примере распознавания фотометрических кривых блеска (ФКБ) КА*

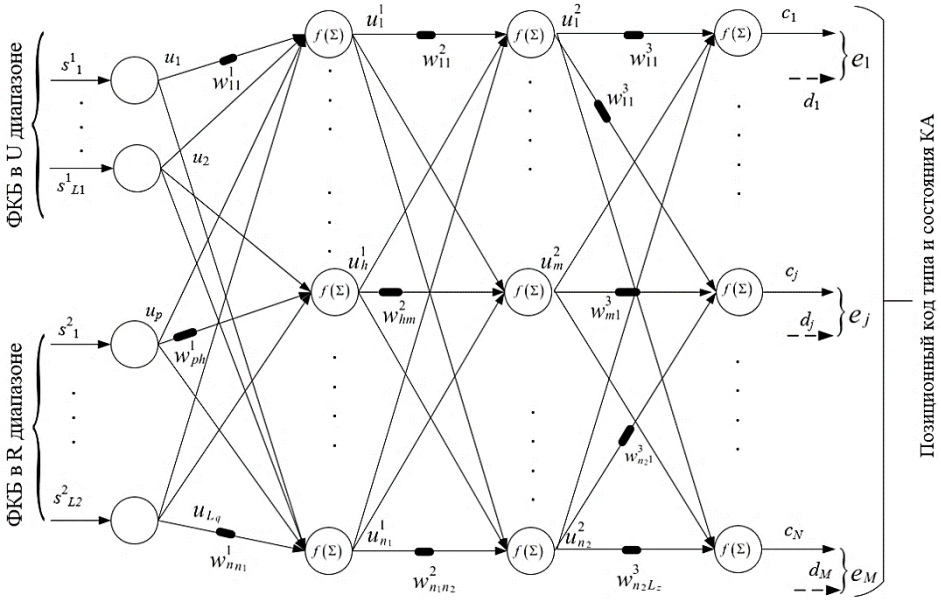



*Рис. 3. Архитектура НС для отображения последовательностей отсчетов двумерной кривой в множество типов и состояний КА с векторной функцией выхода*

То есть наличие единичного уровня выходного сигнала $j$-го нейрона в совокупности с отрицательными уровнями остальных нейронов в целевом векторе свидетельствует о $q_j$-м классе типа и состояния КА (рис. 4).

Расчет взвешенных выходных значений $w_{ij} \cdot f(s_i)$ нейронов с учетом максимального

*Рис. 4. Нормированный в диапазон [0,1] результат функционирования НС с векторной функцией выхода, где номер нейрона с максимальным откликом указывает на индекс идентифицированного типа КА и его вида стабилизации (типовая форма – справа)*

числа слоев осуществляется в соответствии с известным выражением:

$$c_j = f_j^{[3]}\left(\sum_{m=1}^{n_2} w_{mj}^{[3]}\left(f_m^{[2]}\left(\sum_{h=1}^{n_1} w_{hm}^{[2]}\left(f_h^{[1]}\left(\sum_{i=1}^{n} w_{ih}^{[1]} s_i\right)\right)\right)\right)\right),$$

$$f^{[s]}(x) = \frac{e^{\alpha^{[s]}x} - e^{-\alpha^{[s]}x}}{e^{\alpha^{[s]}x} + e^{-\alpha^{[s]}x}}, \quad j = \overline{1, n_3}. \qquad (5)$$

где $n_1$, $n_2$ – число нейронов в скрытых слоях; $n$ – число нейронов распределительного слоя; $s_i$ – $i$-й вход НС; $w$ – весовые коэффициенты по слоям с индексами $i,h,m$ (рис. 2, 3); $f$ – функции активации, тоже по слоям каждая со свои индексом; $\alpha$ – крутизна гиперболического тангенса.

Алгоритмом обучения обоих архитектур НС может служить псевдоньютоновский алгоритм, или процедура, в которой кроме первых используются производные и второго порядка [11], [12].

Для глобальной целевой функции одного выходного нейрона

$$E_j^k = \frac{1}{2}\sum_k e_j^2(k), \qquad (6)$$

где $k$ – итерация обучения; $j$ – номер выходного нейрона, заданной на всей обучающей выборке, алгоритм обучения НС выглядит следующим образом:

$$w_j(k+1) = w_j(k) - (\nabla^2_{w_j} E_j^k)^{-1}(\nabla_{w_j} E_j^k), \qquad (7)$$

где

$$\nabla^2_{w_j} E_j^k = \left\{\frac{\partial^2 E_j^k}{\partial w_{ji}\partial w_{jq}}\right\}, \qquad (8)$$

$\nabla^2_{w_j} E_j^k$ – матрица-гессиан целевой функции по весам синаптических связей НС размером $(n+1)\times(n+1)$, образованная вторыми производными;

$\nabla_{w_j} E_j^k = \left(\frac{\partial^2 E_j^k}{\partial w_{j0}^2}, \frac{\partial^2 E_j^k}{\partial w_{j1}^2}, \cdots, \frac{\partial^2 E_j^k}{\partial w_{jn}^2}\right)$ – вектор-градиент целевой функции размером $(n+1)\times 1$.

В случае сложной многоэлементной НС для синтеза $w_{ij}$ можно использовать псевдоньютоновское упрощение, не используя внедиагональные элементы:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) - \left(\frac{\partial^2 E_j^k}{\partial w_{ji}^2}\right)^{-1} \cdot \frac{\partial E_j^k}{\partial w_{ji}}. \qquad (9)$$

Собственные числа Гессиана оказывают определяющее влияние на динамику обучения методом обратного распространения итоговой невязки в пространстве нейронов выходных слоев НС. Так, на основе матрицы, обратной матрице Гаусса можно выделить несущественные веса $w_{ij}$ между нейронами соседних слоев и достаточно использовать псевдоньютоновский алгоритм Левенберга-Марквардта [13] имеющий вид:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + (J_j(k)J_j^T(k) + \chi I)^{-1} \times \\ \times J_j(k)(d_j(k) - f(w_j^T(k)x(k))), \qquad (10)$$

где $\chi$ – скалярный параметр; $I$ – единичная матрица; $d_j(k)$ – выход $j$-го нейрона выходного слоя; $J_j(k) = \nabla_{Wj} f\left(w_j^T x\ (k)\right)$ – якобиан, матрица частных производных по весам $w_j$ на $k$-й итерации обучения.

В соответствии с формулой (10) отпадает необходимость в высокозатратном или нереализуемом (в смысле вычислительных или временных затрат) псевдообращении матрицы $J_j(k)$,

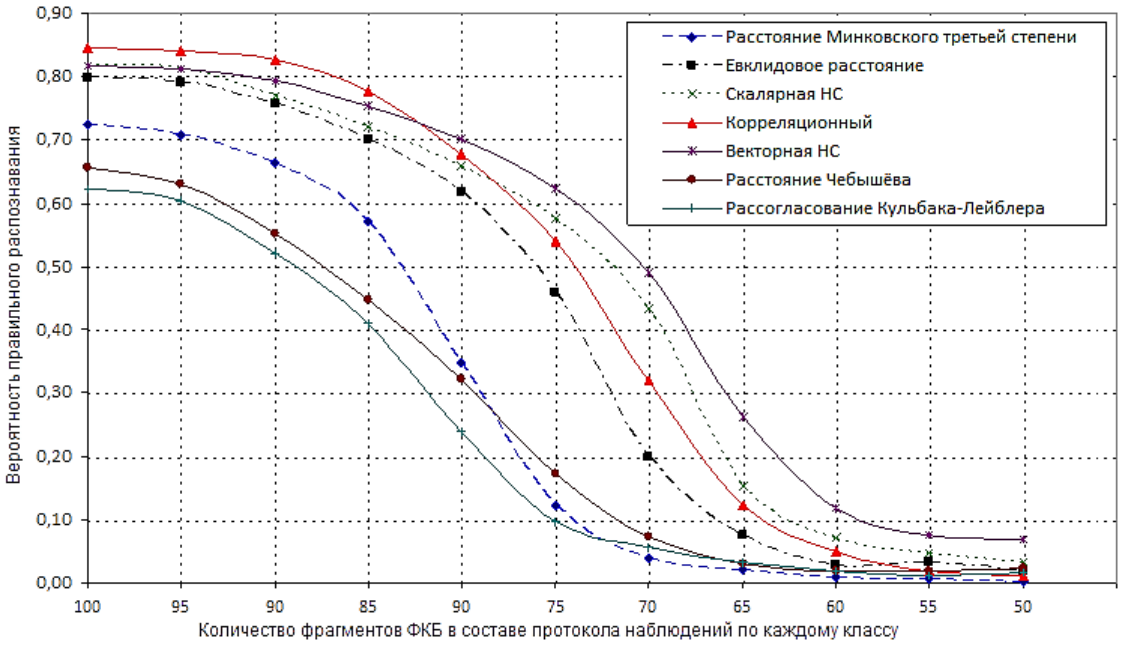



*Рис. 5. Зависимости достоверности распознавания типов форм по фрагментам кривых блеска КА от количества примеров обучающей выборки (ФКБ – фотометрическая кривая блеска)*

обусловленной размерностью НС. Алгоритм обучения Левенберга – Марквардта использует для поиска минимума функционала $E$ комбинированную стратегию линейной аппроксимации и градиентного спуска. Переключение с одной стратегии на другую происходит в зависимости от того, была ли успешной линейная аппроксимация. На рис. 5 показаны зависимости достоверности распознавания типов форм по фрагментам кривых блеска КА, не входящих в обучающую выборку $\Omega_1$, от количества примеров обучающей выборки (проводок КА).

Корреляционный метод, как оптимальный в условиях гауссовских шумов показал высокую достоверность, но является ресурсоемким, и при увеличении числа шаблонов и длин фрагментов кривых становится слабо применим в оперативных задачах. Также он требователен к числу примеров, используемых для синтеза шаблонов кривых. Преимущества НС проявляются при значительных количествах фрагментов ФКБ в составе протокола наблюдений по каждому классу КА, что может свидетельствовать о полезности данного инструментария для приближенного решения обратных задач фотометрии на уровне типовых классов форм и компоновок КА. Кроме того, достоверность различения всех методов, закономерно снижается с ростом числа классов, а сглаживание кривых повышает результативность.

## Библиографический список

1. *Pikovsky S., Rosenblum M., Kurths J.* Phase synchronization in regular and chaotic systems. Int. J. Bifurc. 2000. Chaos, 10 (1). P. 2291–2306.

2. *Сухов П. П.* Фотометрические исследования ГСС «Интелсат 10-02». URL: https://refdb.ru/look/2269184.html (дата обращения: 01.07.2021).

3. *Назаров А. В., Якимов В. Л.* Прогноз параметров технического состояния многорежимных объектов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2005. № 10, 11. С. 34–39.

4. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / О. И. Сухаревский, В. А. Василец, С. В. Кукобко и др. Под ред. О. И. Сухаревского. Х.: ХУПС, 2009. 468 с.

5. *Биргер И. А.* Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

6. Третьяков. И. А., Данилов В. В. Функции сложности для выделения и распознавания характерных участков экспериментальных кривых // Вестник ДонНУ. Серия А: Естественные науки. 2017. № 2. С. 101–107.

7. *Аграновский А. В., Леднов Д. А.* Теоретические аспекты алгоритмов обработки и классификации речевых сигналов. М.: Радио и связь, 2007. 164 с.

8. *Потапова Р. К.* Лингвистические знания и новые технологии // Сб. трудов XI сессии Российского акустического общества. М., 2007. Т. 3. С. 4–13.

9. *Евланов Л. Г.* Контроль динамических систем. М.: Наука, 1979. 432 с.

10. *Полоус А. И.* Теория и практика научных исследований и испытаний радиоэлектронных систем. Ч. II. Теория контроля и диагностики сложных РЭС. М., 1985. 259 с.

11. *Hecht-Nielsen R.* Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks, San Diego, 1987. Vol. 3. P. 11–13.

12. *Shepher A.* Second-Order Methods for Neural Networks. London: Springer-Verlag, 1997. 145 p.

13. *Marquardt D.* An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters, SIAM, 1963. P. 431–442.

**УДК 629.039.58; 614.875** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-141**

***А. П. Григорьев****
*старший преподаватель*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ

*В статье рассматриваются виды, состав и энергии ионизирующего излучения космического пространства, его влияние на бортовую аппаратуру космического аппарата и возможные способы защиты от негативных эффектов. Смоделирован нечеткий регулятор, предназначенный для борьбы с радиационно-индуцированными токами утечки.*
***Ключевые слова:*** *ионизирующее излучение космического пространства, радиационные пояса Земли, солнечные космические лучи, галактические космические лучи, нечеткая логика.*

***A. P. Grigoriev****
*Senior Lecturer*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIATION-RESISTANT POWER SUPPLY OF SPACE EXECUTION

*The article discusses the types, composition and energy of the ionizing radiation of outer space, its effect on the onboard equipment of the spacecraft and possible ways of protecting against negative effects. A fuzzy regulator designed to combat radiation-induced leakage currents was also modeled.*
***Keywords:*** *ionizing radiation of outer space, radiation belts of the Earth, solar cosmic rays, galactic cosmic rays, fuzzy logic.*

Актуальность тематики исследования радиационно-стимулированной деградации полупроводникой и интегральной схемотехники обусловлена вопросами надежности и долговечности при освоении дальнего космоса и выполнением целого ряда других целевых задач. Воздействие ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП) может привести к отказу бортовой аппаратуры (БА) и элементной базы.

Известно, что ИИКП состоит из заряженных первичных частиц (электронов, протонов), а также продуктов ядерного распада, связанных с первичными частицами. Основные эффекты воздействия на полупроводники (ПП) и интегральные схемы (ИС) связаны с накоплением дозы ИИ, а также возникновением одиночных сбоев и отказов за счет воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных частиц [1].

Основные источники ИИКП – это электроны и протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также солнечные космические лучи (СКЛ) и галактические космические лучи (ГКЛ).

Магнитное поле Земли защищает от потока протонов и электронов, таким образом, вблизи планеты образованы два радиационных пояса Ван Аллена-Вернова (рис. 1). В данных поясах заряженные частицы, захваченные магнитным полем, хаотично движутся и соударяются, образуя тормозное излучение. В результате исследований советских и американских ученых, установлено, что на высоте 4000 км во внутреннем поясе преимущественно преобладают положительно заряженные протоны, а на высоте 17 000 км во внешнем – отрицательно заряженные электроны. Эксплуатация космического аппарата (КА) «Молния», в непосредственной близости от ЕРПЗ, показала, что время, проводимое в этих поясах, необходимо минимизировать из-за пагубного действия ИИКП на БА.

Для высоких орбит (от 36 000 км) дополнительный вклад в суммарную поглощенную дозу вносят сложнопрогнозируемые протоны СКЛ, возникающие из-за вспышек на Солнце. В состав протуберанцев входят протоны с альфа-частицами и более тяжелые ядра с энергией 1 – 100 МэВ/нуклон [2]. Потоки протуберанцев проявляются в дискретные моменты времени, но их интенсивность зачастую превосходит потоки ГКЛ на многие порядки.

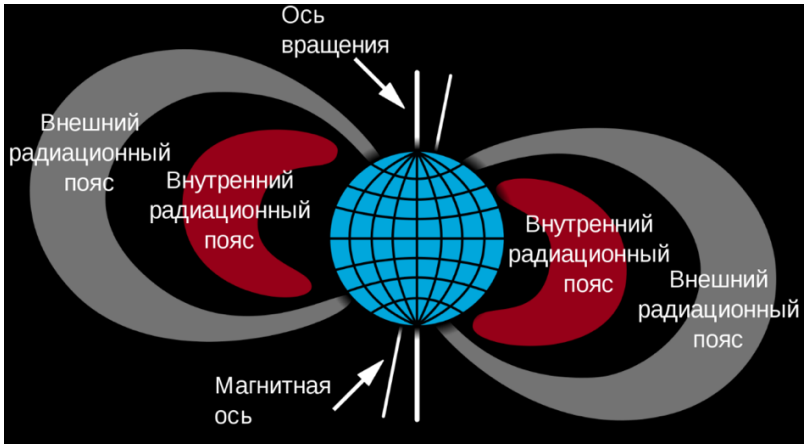



*Рис. 1. Радиационные пояса Земли*

*Таблица 1*

**Характеристики первичных космических лучей**

| | ГКЛ | СКЛ |
|---|---|---|
| Состав | Ядерная компонента – ~90 % протонов, ~10 % ядер гелия, ~1 % более тяжелых ядер<br>Электроны (~1 % от числа ядер)<br>Позитроны (~10 % от числа электронов)<br>Антиадроны < 1 % | 98-99 % протоны, ~1,5 % ядра гелия |
| Диапазон энергий | $10^6$–$10^{21}$ эВ | $10^5$–$10^{11}$ эВ |

*Таблица 2*

**Источники ИИКП, виды воздействия, вызываемые эффекты и методы борьбы с ними**

| Источник ИИКП | Вид воздействия | Вызываемый эффект | Методы защиты |
|---|---|---|---|
| Радиационные пояса Земли | Накопление полной поглощенной дозы излучения | Радиационно-индуцированные токи утечки, сдвиг порогового напряжения транзистора | Слежение за потребляемым током, быстрое включение и выключение питания;<br>использование МС на сапфировой подложке;<br>Использование процесса изоляции двумя p-n переходами |
| СКЛ | | | |
| ГКЛ | Воздействие одиночных частиц | Пробой подзатворного диэлектрика, тиристорный эффект [4] | увеличение толщины стенок корпуса, экрана, подложки;<br>схемотехнические решения по геометрии размещения элементов;<br>дублирование и троирование наиболее уязвимых элементов [5] |

Ионы более тяжелых элементов из состава СКЛ, не вносят ощутимый вклад в интегральную поглощенную дозы, но могут приводить к разовым сбоям и единичным отказам за счет эффектов от поражения отдельными частицами, особенно в цифровых микросхемах (МС).

Состав ГКЛ и СКЛ изучены подробно (табл. 1) [3].

В табл. 2 приведены источники ИИКП, виды воздействия, вызываемые эффекты и методы борьбы с ними.

В рамках данной статьи рассмотрим возможность применения методов нечеткой логики [6] для борьбы с радиационно-индуцированными токами утечки и сдвигом порогового напряжения транзисторов.

Конкретной задачей моделируемого нечеткого регулятора будет принятие решения о необходимости осуществления снятия питания со схемы и/или МС при прохождении через нее определенной комбинации заряженных частиц.

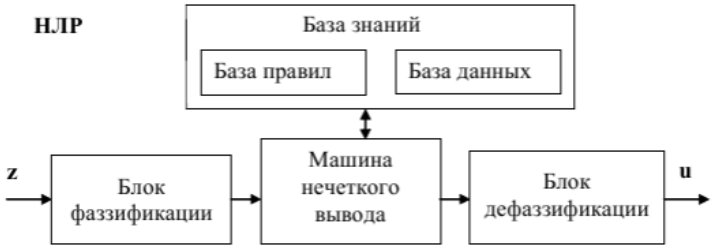



*Рис. 2. Структурная схема нечеткого регулятора*

На рис. 2 представлена структурная схема нечеткого регулятора [7].

В данной структурной схеме: z – входное воздействие; база знаний – заранее известная информация о заряженных частицах; блок фаззификации установливает соответствие между значением входной переменной системы и значением функции принадлежности (ФП) соответствующего ей терма входной лингвистической переменной (ЛП); аппарат нечеткого вывода осуществляет: агрегирование – процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода, активизацию – процедуру нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций, аккумулирование – процедуру нахождения ФП для каждой из выходных ЛП; блок дефаззификации производит процедуру нахождения количественного значения для каждой из выходных ЛП; u – управляющее воздействие.

Моделирование нечеткого регулятора осуществляется в пакете расширения Fuzzy Logic Toolbox программы MATLAB [8]. На первом этапе необходимо задать входы и выходы системы, ФП и необходимые диапазоны (рис. 3).

Так как интересующие частицы условно разделены на две группы, то и входов системы будет два.

Зададим ФП для входных и выходных величин. В соответствии с положениями центральной предельной теоремы [9]: «Сумма большого числа как угодно распределенных независимых случайных величин распределена асимптотически нормально, если только слагаемые вносят равномерно малый вклад в сумму». Так как степень неопределенности, касающаяся точного количественного состава частиц, их масс, энергий, скорости, времени появления и др., достаточна, велика, то используется нормальное или Гауссовское распределение. Предположим, что суммарная мощность потока составляет 100 МэВ, разделим эту мощность на диапазоны в соответствии с процентным содержанием частиц, представленном в табл. 1. Таким образом, ФП для входных величин представлены на рис. 4, 5.

Поскольку моделируемый нечеткий регулятор принимает решение о необходимости снятия питания, то его выход выглядит следующим образом (рис. 6).

Далее формируется база нечетких лингвистических правил (рис. 7). Исходя из того, что именно протоны составляют подавляющее большинство в потоке СКЛ, и более вероятно, что именно они вызовут те негативные эффекты, с которыми предполагается бороться, то при этом более тяжелые элементы в данном случае будут менее опасны.

Проверим правила после выполнения процедуры нечеткого вывода для значений входных переменных (рис. 8), а также объемную ви-

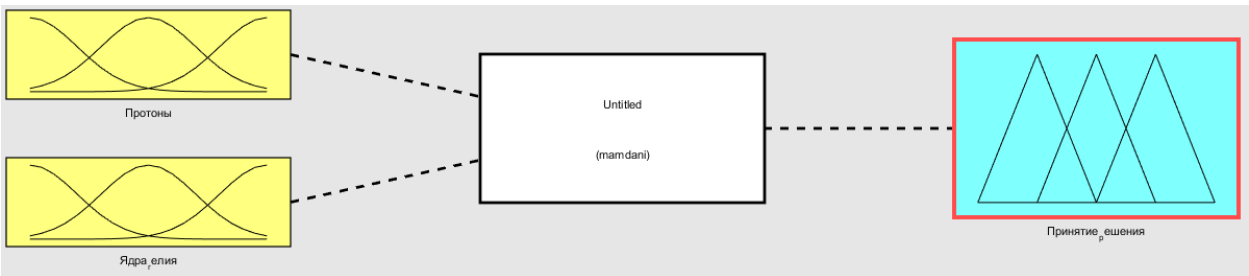



*Рис. 3. Исходные данные*

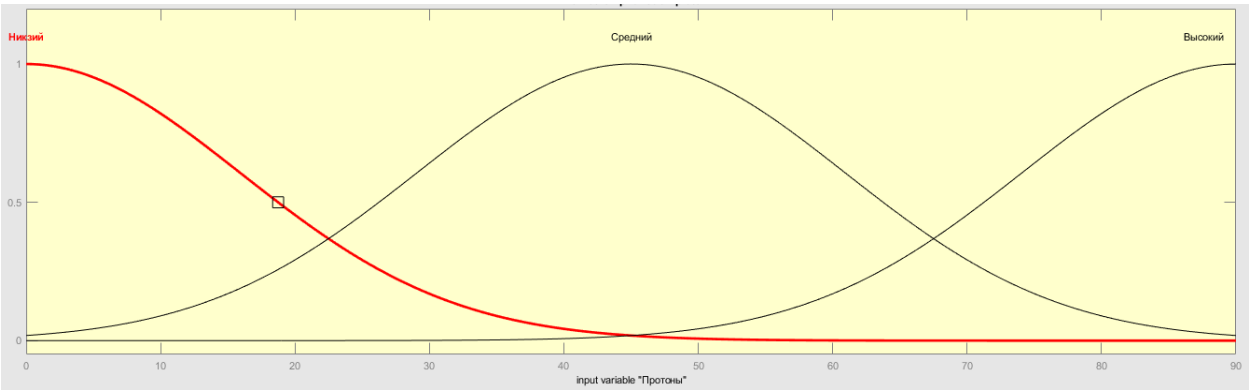



*Рис. 4. Функция принадлежности для протонов*

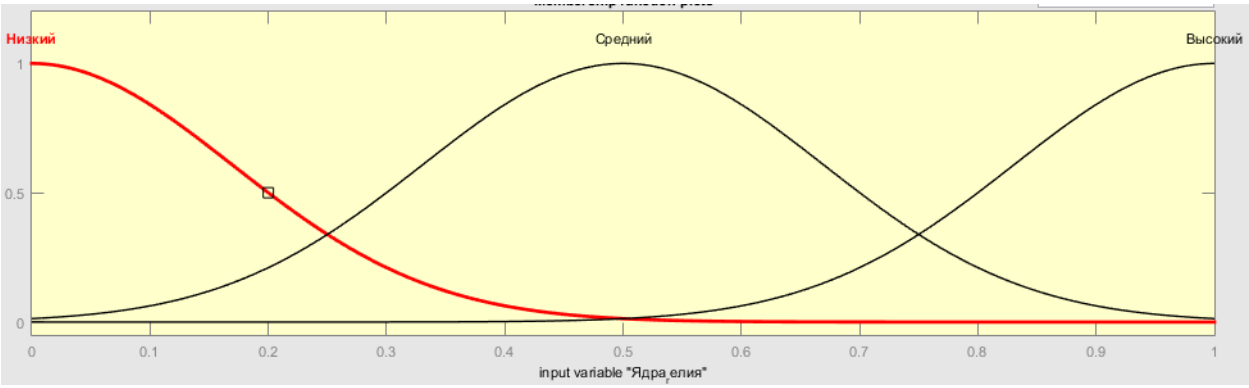



*Рис. 5. Функция принадлежности для ядер гелия*

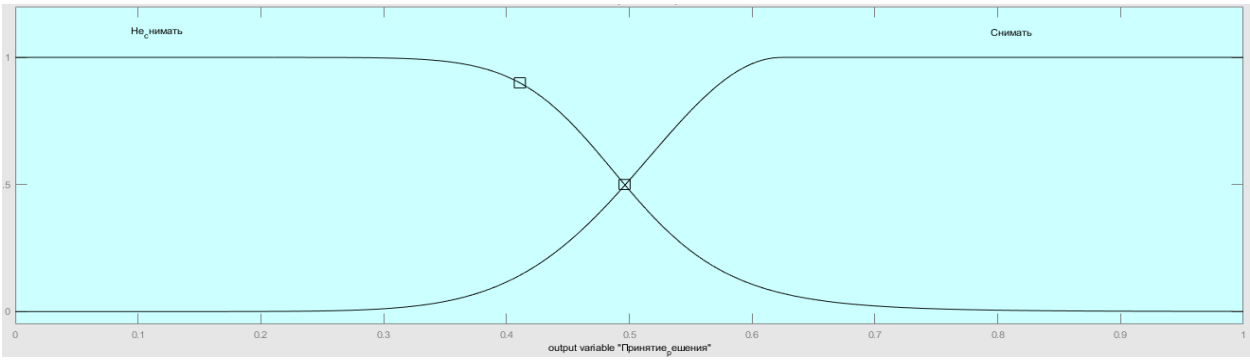



*Рис. 6. Функция принадлежности для принятия решения о снятии питания*

1. If (Протоны is Низкий) and (Ядра_гелия is Низкий) then (Принятие_решения is Не_снимать_питание) (1)
2. If (Протоны is Средний) and (Ядра_гелия is Низкий) then (Принятие_решения is Не_снимать_питание) (1)
3. If (Протоны is Высокий) and (Ядра_гелия is Низкий) then (Принятие_решения is Снять_питание) (1)
4. If (Протоны is Низкий) and (Ядра_гелия is Средний) then (Принятие_решения is Не_снимать_питание) (1)
5. If (Протоны is Средний) and (Ядра_гелия is Средний) then (Принятие_решения is Снять_питание) (1)
6. If (Протоны is Высокий) and (Ядра_гелия is Средний) then (Принятие_решения is Снять_питание) (1)
7. If (Протоны is Высокий) and (Ядра_гелия is Высокий) then (Принятие_решения is Снять_питание) (1)
8. If (Протоны is Высокий) or (Ядра_гелия is Высокий) then (Принятие_решения is Снять_питание) (1)

*Рис. 7. Заданные нечеткие лингвистические правила*

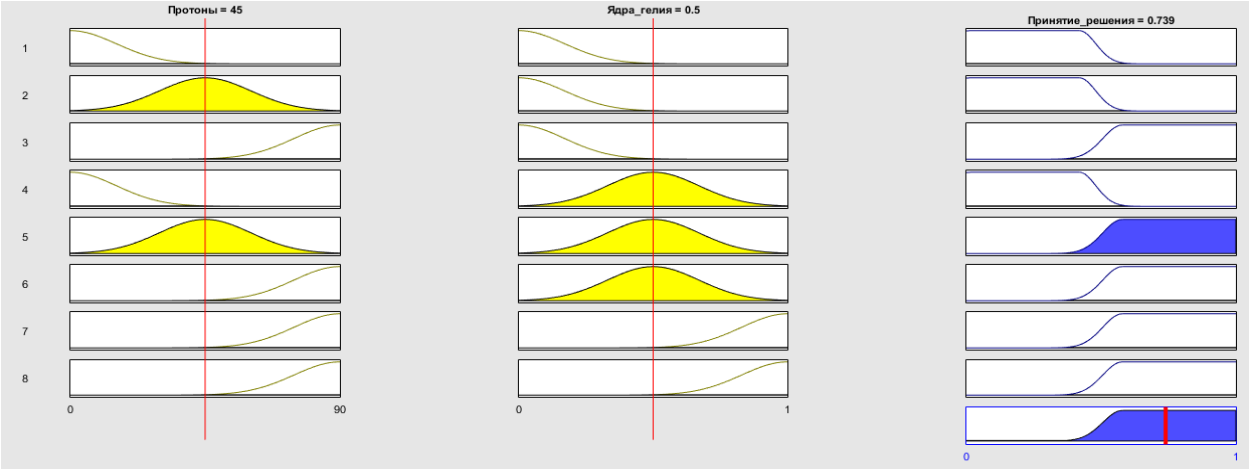



*Рис. 8. Значение переменных при заданных правилах*

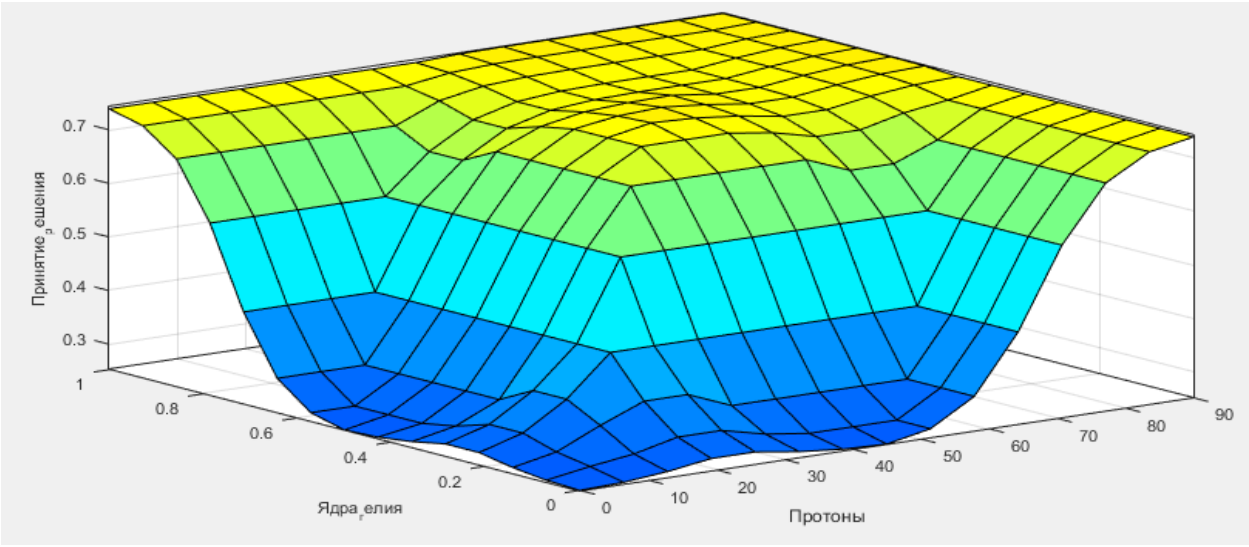



*Рис. 9. Поверхность отклика*

зуализацию полученной поверхности отклика (рис. 9).

В данной работе были рассмотрены причины и последствия влияния ИИКП на БА из состава КА, а также методы защиты от данного негативного воздействия. В пакете расширений Fuzzy Logic Toolbox среды MATLAB смоделирован нечеткий регулятор для борьбы с радиационно-индуцированными токами утечки и со сдвигом порогового значения транзисторов, вызванным попаданием отдельных заряженных частиц.

Были заданы входные величины в виде двух групп частиц, составляющих солнечные космические лучи. Выходной величиной смоделированного нечеткого регулятора является принятие решения о снятии питания с микросхемы.

Предложенный подход позволяет упростить задачу о принятии решения и повысить динамические характеристики по сравнению с классическими методами, так как практически невозможно быстро и точно определить состав солнечных космических лучей с помощью «жесткой» логики, а постоянное снятие питания со схемы при регистрации каких-либо заряженных частиц лишь приведет к сбоям и ошибкам в работе, а также к снижению эффективности БА.

## Библиографический список

1. *Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных

схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.

2. *Мурзин С. В.* Введение в физику космических лучей. М.: Атомиздат, 1979.

3. *Ширков Д. В.* Физика микромира. М.: Советская энциклопедия, 1980. 528 с.

4. *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М.: Радио и связь, 2004.

5. *Ладыгин Е. А., Паничкин А. В., Горюнов Н. Н.* Основы радиационной технологии микроэлектроники. Механизмы образования и физическая природа радиационных центров в полупроводниковых структурах. М.: МИСиС, 1994.

6. *Батыршин И. З.* Основные операции нечеткой логики и их обобщения. Казань: Отечество, 2001. 100 с.

7. *Амосов О. С., Амосова Л. Н., Иванов С. Н.* Синтез оптимальных систем управления электромеханическим теплогенерирующим комплексом с использованием нечетких систем // Интеллектуальные системы. 2019. № 1 (19).

8. *Дьяконов В. П.* MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.

9. *Фарафонов В. Г., Устимов В. И.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2009. Ч. 1. 71 с.

**УДК: 004.588** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-147**

***А. П. Григорьев****
*старший преподаватель*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ

*В рамках статьи осуществлена разработка и исследование системы по сопровождению членов экипажа воздушного судна и/или летательного аппарата (выдача рекомендаций, подсказок пилоту, штурману, бортинженеру) при совершении пространственных эволюций, смене режимов полета, выполнении маневров и различных фигур пилотажа. Данная система позволяет пилоту выбирать, использовать подсказки или нет. Независимо от выбора, и в том, и в другом случае система улучшит качество пилотирования и облегчит работу. Еще одна задача, которую в состоянии решать система поддержки экипажа – это адаптация к каждому конкретному пилоту, исходя из уровня его текущей подготовки. Для опытного пилота информация может быть представлена в сокращенной форме. Данная концепция особенно популярна для военных летательных аппаратов, так как необходимость ведения боевых действий значительно повышает загруженность пилота и в то же время требует максимальной концентрации, а большие перегрузки или ранение могут привести к частичной или полной потере способности управления и даже к потере сознания.*
***Ключевые слова:*** *воздушное судно, летательный аппарат, оператор летательного аппарата, пилотирование, система управления движением на аэродроме, бортовые информационные системы, навигационный эргодический комплекс, адаптивный интерфейс «человек-оператор – летательный аппарат», система поддержки принятия решения.*

***A. P. Grigoryev****
*Senior Lecturer*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# CREW DECISION SUPPORT SYSTEM

*Within the framework of the article, the research and development of a crew support system was carried out, which performs the task of escorting crew members of an aircraft and / or an aircraft (issuing recommendations, tips to the pilot, navigator, flight engineer) when implementing control, making spatial evolutions, changing flight modes, performing maneuvers and various aerobatics. This system allows the pilot to choose whether to use prompts or not. Regardless of the choice and in either case, the system will improve the quality of piloting and facilitate the work. Another task that the crew support system is able to solve is adaptation to a specific pilot, based, for example, on the level of his current training. For an experienced pilot, the information may be presented in an abbreviated form. This concept is especially popular for military aircraft, since the need for combat significantly increases the workload of the pilot and at the same time requires maximum concentration, and large overloads or injury can lead to partial or complete loss of control ability and even loss of consciousness.*
***Keywords:*** *aircraft, aircraft operator, piloting, airfield traffic control system, on-board information systems, navigation ergatic complex, adaptive interface «man-operator-aircraft», decision support system.*

При общей тенденции к сокращению штатной должности штурмана в составе экипажа воздушных судов (ВС) и/или летательных аппаратов (ЛА), штурманские задачи выполняет первый или второй пилот. При этом данные задачи являются дополнительными, а учитывая полученную экспериментальным путем зависимость вероятности выполнения поставленной задачи от загрузки человека-оператора (ЧО) [1], целесообразно рассмотреть потенциальную возможность разработки и применения на борту ВС и ЛА системы поддержки экипажа (СПЭ) на базе адаптивного интерфейса «ЧО – ЛА» [1], входящего в состав навигационного эргодического комплекса (НЭК) [2].

Целесообразность использования и перспективы данных систем несложно оценить, проанализировав западный опыт внедрения систем поддержки принятия решения, таких как система управления движением на аэродроме (СУДА).

В настоящее время СУДА выполняет следующие функции [1]: предотвращает попадание ЛА не на свою взлетно-посадочную полосу (ВПП); предупреждает о поворотах; управляет рулением; информирует о движении на аэродроме, о занятости ВПП; передает инструкции служб управления воздушным движением (УВД).

Как видно из этого перечня, только база данных аэропортов является дополнением к суще-

ствующей авионике ВС и ЛА, все остальные системы уже устанавливаются на борту, использование данных систем в составе СУДА является не более чем расширением их функционала.

Важным достоинством СУДА является то, что она позволяет безопасно осуществлять рулежку, взлетать и садиться даже в условиях плохой видимости.

Подобные системы уже разработаны и эксплуатируются, это Surface Guidance System (Flight Dynamics), Visual Guidance System (BAE Systems) и Runway Incursion Prevention System (RIPs), созданная NASA [1].

Учитывая тенденцию развития СУДА и положительный аспект их внедрения и эксплуатации за рубежом, автором данной статьи рассматривается задача по проектированию и исследованию СПЭ, являющейся летным аналогом СУДА и предназначенной для сопровождения экипажа и выдачи рекомендаций по управлению ВС и/или ЛА. Стоит отметить, что СПЭ входит в состав бортового оборудования (БО) [1] и при необходимости используется экипажем в сложной пилотажно-навигационной обстановке для повышения безопасности полета ЛА за счет снижения уровня аварийности. С другой стороны, чем «умнее» самолет, тем меньше шансов реализовать безаварийный полет в автоматическом режиме, поскольку за счет увеличения на борту кол-ва систем, значительно возрастает вероятность их отказа. Так как просчитать все возможные варианты и развитие аварийной ситуации практически невозможно, то навыки экипажа (пилота, штурмана, бортинженера) останутся востребованными постоянно, поскольку каждый авиационный специалист (АС) проходит длительную непрерывную подготовку, прежде чем допуститься к полетам на том или ином типе ВС и/или ЛА. Соответственно, навыки и профессиональные компетенции, а также оперативное и своевременное принятие обоснованных решений остаются более важными по сравнению с функциональными возможностями бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) и автопилотов (АП). Таким образом, несмотря на очевидные достоинства БЦВМ и АП в части достоверности, точности, скорости и адекватности решения текущих пилотажно-навигационных задач, при реализации на борту ЛА и/или ВС интерфейсов ЧО – ЛА [1], ведущую роль в контуре управления с точки зрения иерархии организации занимает ЧО [3]. Тем не менее, учитывая ограничения ЧО (пропускная способность, особенности функционирования органов чувств, нервной системы, оперативной кратковременной и долговременной памяти), применение на борту СПЭ позволит говорить о потенциальном повышении качества пилотирования за счет оказания поддержки экипажу в предстрессовых и стрессовых ситуациях. Использование данной системы ориентировано в большей степени на сопровождение и поддержку АС с недостаточным опытом и/или начинающих, неопытных пилотов. Также СПЭ целесообразно использовать при обучении летного состава управлению ЛА. Опытные АС смогут воспользоваться возможностями СПЭ при реализации сложных маневров или фигур высшего пилотажа, при управлении в сложных внешних (погода, видимость и пр.) и внутренних (большая информационная загрузка, режим цейтнот и т. д.) условиях.

Главными задачами СПЭ являются: прокладывание маршрута от исходного пункта до конечного, предупреждение о повороте и развороте ЛА, расчет соответствующих углов и упреждений, определение оптимального времени выхода на поворот и длительности данного маневра, а также расчет и построение оптимальной (по критерию минимума отклонения от линии заданного пути) траектории движения ЛА. Вывод информации осуществляется на пилотажный и навигационный кадры многофункционального дисплея (МФД) в виде карты и соответствующих текстовых подсказок.

В период предварительной подготовки к полету, в соответствии с заданием на предстоящий полет, на полетной карте прокладывается маршрут. Для каждого пункта маршрута определяются геодезические координаты (широта $B$ и долгота $L$) [4] и следующие навигационные параметры [3]: радиус Земли $R$ = 6372,2 км; Угол крена, к примеру, $\gamma$=11°; путевая скорость $W$ = 250 м/с; истинная воздушная скорость $V$ = 620 м/с; высота полета $h$ = 2800 м.

Поскольку решение задачи по участкам маршрута выполняется на поверхности сферы в сферических координатах (широта $\varphi$, долгота $\lambda$), то геодезические координаты переводятся в сферические по формулам:

$$\varphi = B - 9'\sin 2B, \quad \lambda = L. \tag{1}$$

Выражение для расчета длины ортодромии:

$$S_{i,i+1} = Rз \cdot a\cos[\cos(\varphi_i)\cdot\cos(\varphi_{i+1})\times \\ \times\cos(\lambda_{i+1}-\lambda_i)+\sin(\varphi_i)\cdot\sin(\varphi_{i+1})], \tag{2}$$

где $i$ – 1, 2, 3…$n$, номер ППМ по порядку.

В случае изменения направления полета с целью вывода ВС на новую линию заданного пути (ЛЗП) [4], выполняется боковое маневри-

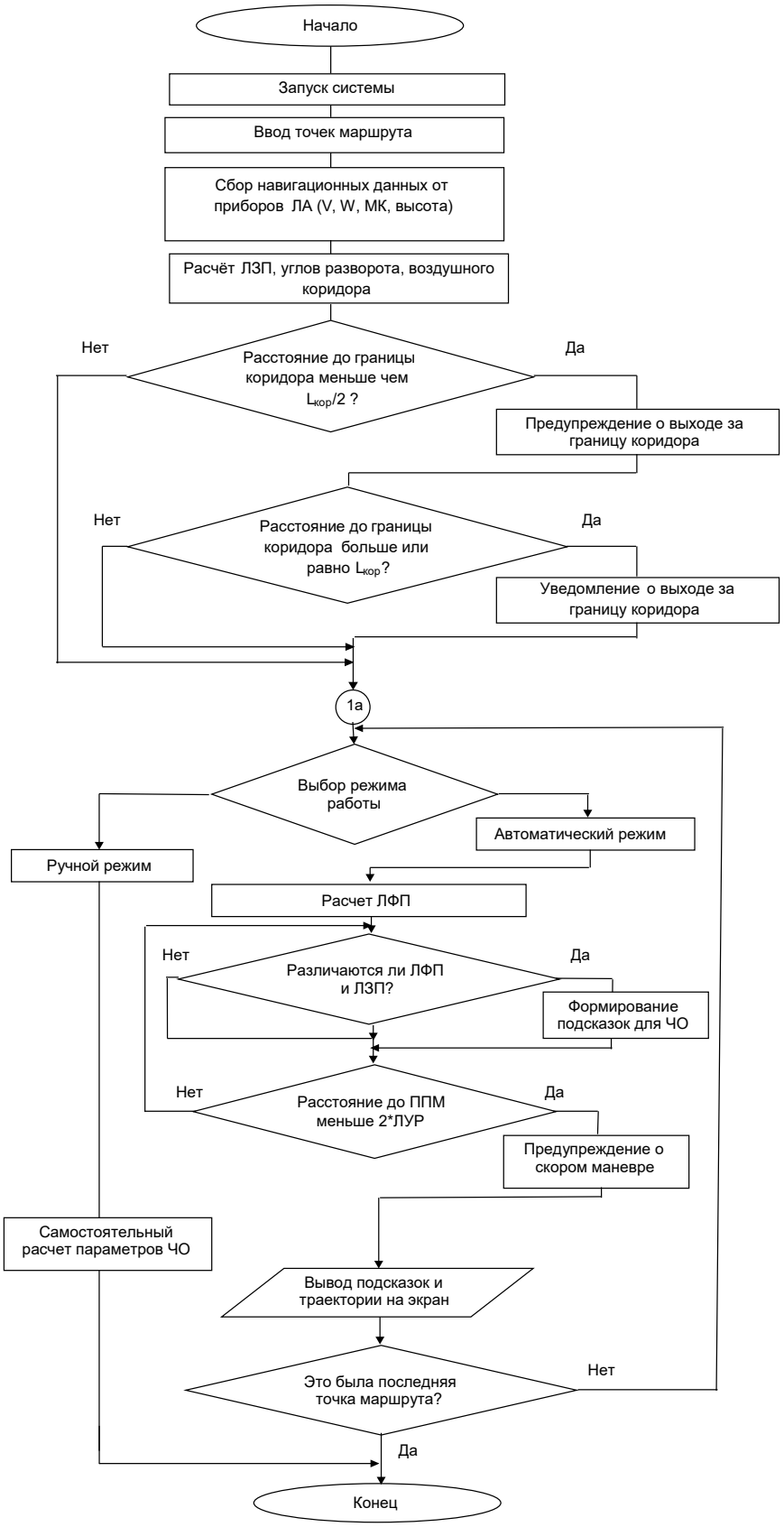



*Рис. 1. Алгоритм взаимодействия человека-оператора с системой поддержки экипажа*

рование ВС. Элементами разворота являются радиус, время разворота на заданный угол разворота (УР), а также путь, проходимый ВС за время разворота.

Для расчета радиуса разворота требуется знать скорость ВС и крен, с которым будет выполняться разворот:

$$r_{\text{разв.}} = \frac{W^2}{g \cdot tg(\gamma)}, \quad (3)$$

где $W$ – путевая скорость ВС; $g$ – ускорение свободного падения; $g = 9{,}81$; $\text{tg}(\gamma)$ – тангенс крена ВС.

Угол разворота – угол, на который разворачивается продольная ось самолета при переходе с одной ЛЗП на другую. В связи с тем, что на картах публикуется заданный магнитный путевой угол (ЗМПУ), УР можно примерно определить по их разности:

$$УР = ЗМПУ_{i+1} - ЗМПУ_i; \quad (4)$$

$$ЗМПУ_i = ЗПУ_i - M_i, \quad (5)$$

где $M_i$ – магнитное склонение в $i$-м ППМ маршрута.

Линейное упреждение разворота (ЛУР) – это расстояние до ППМ, которое необходимо пролететь с упреждением (то есть с недолетом), чтобы осуществить плавное вписывание в поворот:

$$ЛУР = R \cdot tg \cdot \frac{УР}{2}. \quad (6)$$

Для плавного вписывания в следующую ЛЗП необходимо также знать боковое упреждение разворота (БУР):

$$БУР = R \cdot tg \cdot \frac{УР}{2} \cdot \sin УР. \quad (7)$$

Время разворота (ВР) – это время, за которое самолет повернет на нужный угол:

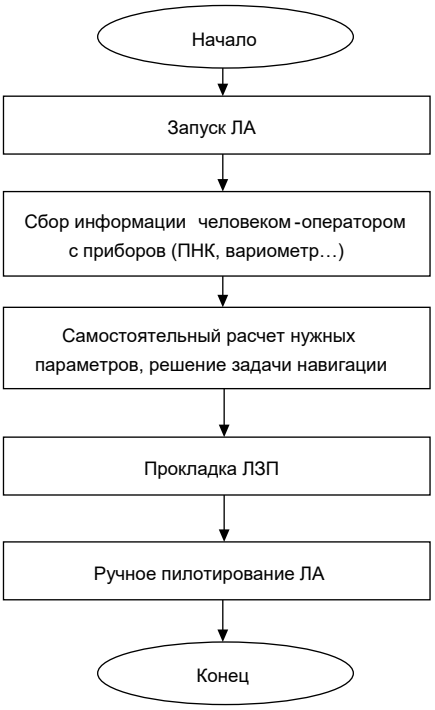



*Рис. 2. Алгоритм работы системы поддержки экипажа в ручном режиме*

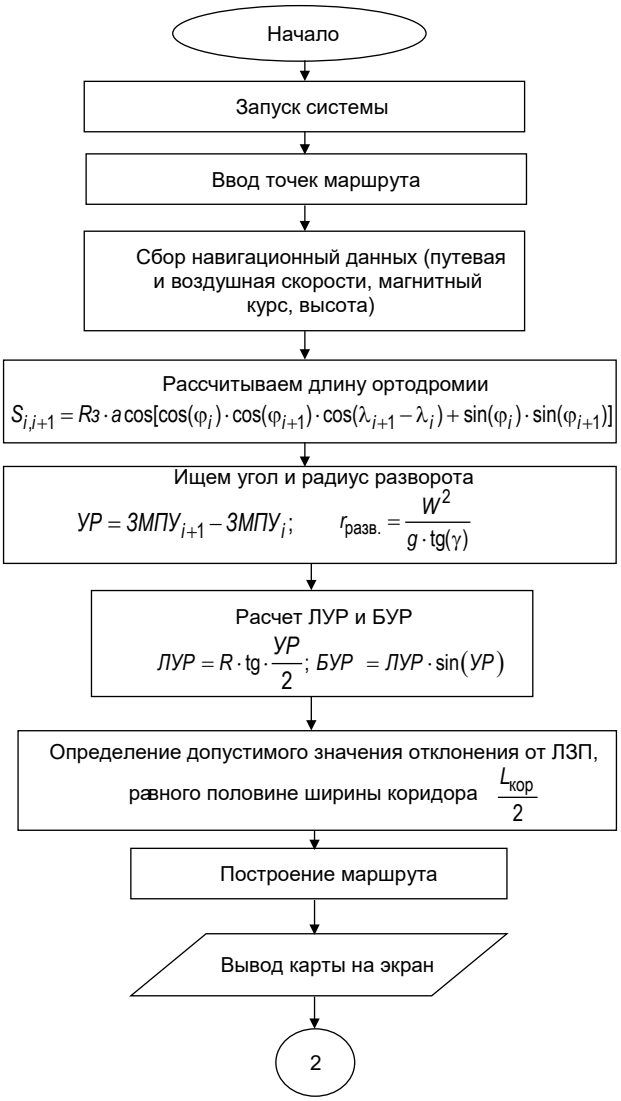



*Рис. 3. Алгоритм работы системы поддержки экипажа в автоматическом режиме*

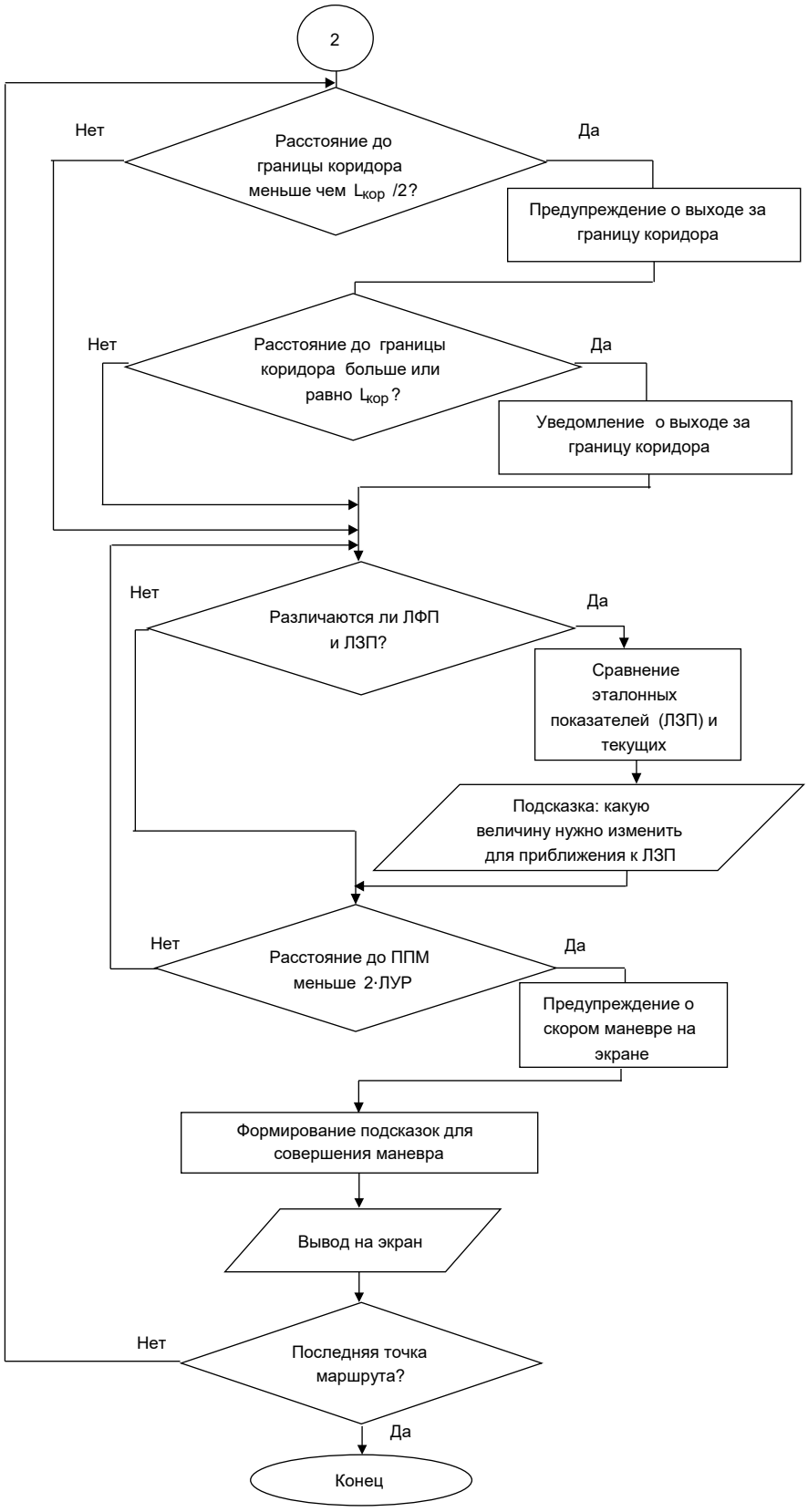



*Рис. 3а. Алгоритм работы системы поддержки экипажа в автоматическом режиме*

$$BP = \left(\frac{УР}{360}\right) \cdot \left(\frac{2\pi R}{V}\right). \quad (8)$$

Проектируемая система взаимодействует с ЧО по определенному алгоритму (рис. 1) и считывает данные со всех приборов ЛА, рассчитывает ЛЗП и воздушный коридор, углы и время разворота.

В зависимости от режима, который выбирает ЧО, автоматический или ручной, СПЭ выполняет различные функции.

Включение системы производится при запуске ЛА, далее требуется внести координаты точек маршрута, после чего СПЭ начинает опрашивать БО и аккумулировать от приборов соответствующие данные, такие как: V, W, магнитный курс (МК), высота. Имея всю необходимую информацию, СПЭ начинает высчитывать элементы самолетовождения [3], [4].

Ручной режим (рис. 2) представляет собой ручное управление ЧО, когда он самостоятельно считывает показания приборов, высчитывает ЛЗП, углы разворота, и самостоятельно управляет ВС при совершении сложных маневров.

Автоматический режим (рис. 3, 3*а*) включает в себя вывод на экран карты и подсказок. Получив данные от пилотажно-навигационного комплекса (ПНК), система строит ЛФП и сравнивает ее с ЛЗП. Если они различаются, система формирует подсказки, в которых указывает, какие навигационные данные требуется изменить. Также СПЭ выдает предупреждающие информационные сообщения (подсказки). Если ЛА близок к выходу за заданную ширину коридора и/или эшелона, если требуется совершить маневр, например, разворот или поворот, то система своевременно предупредит об этом экипаж. Например, в случае с поворотом, СПЭ показывает на экране, с какими характеристиками полета ЛА войдет в поворот согласно текущей ЛЗП. Все данные при этом выводятся на МФД. В непосредственной близости от МФД располагается кнопка управления системой, при нажатии на которую ЧО включает автоматический режим. При этом, на МФД выводится карта с местоположением ВС, изображением текущей ЛЗП, воздушного коридора и эшелона. Внизу экрана выводятся подсказки и предупреждающие сообщения.

В программу для автоматического и ручного режимов вносятся исходные данные, вследствие чего она рассчитывает заданную линию маршрута, ширину воздушного коридора и нужные углы разворота. Далее система сравнивает значения фактические и эталонные, высчитывает разницу и формирует подсказки, которые в дальнейшем выводятся на многофункциональный дисплей.

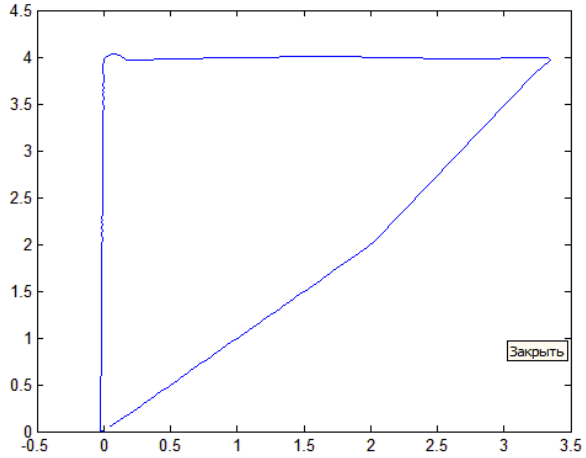



*Рис. 4. График контрольного моделирования*

Результат контрольного моделирования представлен на рис. 4.

Для повышения автономности СПЭ и упрощения процедуры интеграции в состав БО самолета, по мнению автора статьи, целесообразно реализовать систему на отдельном микроконтроллере, а не на штатной БЦВМ, с использованием вместо МФД (размещаемым на приборной доске) отдельной СОИ [5] на базе ИЛС.

Из всего сказанного следует, что СПЭ нужны не для того, чтобы уменьшить участие пилота в процессе пилотирования, а для того, чтобы упростить ему эту задачу. Качественные СПЭ – не максимально разгружают пилота, а оставляют пилота в контуре управления, полностью осознающим сложившуюся ситуацию, не допуская в то же время его перегрузки.

## Библиографический список

1. *Кучерявый А. А.* Бортовые информационные системы: курс лекций / Под. ред. В. А. Мишина, Г. И. Клюева. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 504 с.

2. *Козарук В. В., Ребо Я. Ю.* Навигационные эргодические комплексы самолетов. М.: Машиностроение, 1986.

3. *Бабич О. А.* Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1999.

4. *Мамаев В. Я.* Воздушная навигация и элементы самолетовождения: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2002. 256 с.

5. *Карамайкин А. С., Мясоедов В. Б.* Проектирование систем отображения информации: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 1995.

**УДК 623.4.017**

***В. В. Езерский****
*доктор технических наук, профессор*
***А. А. Пляскина****
*аспирант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИАЛЬНОГО ОСНАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

*На системном уровне рассмотрены эксплуатационно-технические характеристики специального оснащения воздушного базирования и их влияние на эффективность применения данного вида оснащения по целевому назначению.*
***Ключевые слова:*** *эксплуатационно-технические характеристики, надежность, эксплуатационность, эргономичность, отказоустойчивость, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, показатели надежности.*

***V. V. Yezersky****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***A. A. Plyaskina****
*PhD Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# SYSTEM ANALYSIS OF OPERATIONAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF SPECIAL AIR-BASED EQUIPMENT

*At the system level, the operational and technical characteristics of helicopter-based cannon armament and their impact on the effectiveness of using this type of armament for its intended purpose are considered.*
***Keywords:*** *operational and technical characteristics, reliability, operability, ergonomics, fault tolerance, readiness coefficient, technical utilization coefficient, reliability indicators.*

Целенаправленный процесс функционирования (ЦНПФ) специального оснащения из состава авиационного оснащения воздушного судна при решении целевой задачи – нанесения ущерба объектам наземного и морского базирования характеризуется определенным качеством, определяемого набором свойств применяемого оснащения – эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ). Применительно к авиационному оснащению воздушного судна под ЭТХ понимается комплекс количественных и качественных показателей, характеризующих техническое совершенство конструкции искомого оснащения и его эксплуатационной документации к сохранению, поддержанию и восстановлению эксплуатационных качеств специального оснащения в процессе его технической эксплуатации.

В структурном отношении ЭТХ специального оснащения включают характеристики надежности, отказоустойчивости, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности финального изделия и, в общем случае, направлены на сохранение или быстрое восстановление работоспособности образца специального оснащения.

Работоспособность специального оснащения – такое его состояние, при котором искомое оснащение сохраняет способность выполнять заданную функцию с установленными параметрами, определяется прежде всего совокупностью таких качеств специального оснащения, как прочность (несущая способность) и надежность. Одним из важнейших этапов проектирования изделий оснащения и техники является математическое моделирование, посредством которого прогнозируется надежность и несущая способность разрабатываемых изделий в различных условиях эксплуатации.

В современных условиях определение ЭТХ на стадии проектирования специального осна-

щения воздушного базирования выполняется расчетными методами, основанными на статистических или физических моделях отказов. Так, в частности, ввиду простоты ее применения, наиболее распространена при определении долговечности специального оснащения воздушного базирования первая группа методов, базирующаяся на справочных данных об интенсивностях отказов типовых узлов изделия, работающих в схожих условиях эксплуатации. Вторая группа методов часто используется в рамках теории выбросов, то есть долговечность определяется в зависимости от вероятности возникновения сочетания нагрузок, приводящего к мгновенному отказу системы.

Однако развитие научно-технического прогресса не стоит на месте, в виду этого возникают технические решения, не позволяющие использовать только статистические методы при расчете надежности специального оснащения воздушного базирования.

В свою очередь применение расчетных методов прогнозирования надежности приводит к ухудшению точностных характеристик специального оснащения воздушного базирования, что влечет за собой для разработчика увеличение экономической нагрузки при гарантийном обслуживании специального оснащения воздушного базирования.

Таким образом, определенным постулатом предварительной оценки ЭТХ специального оснащения на этапе разработки является применение комплексного подхода – сочетание расчетов искомых ЭТХ как с использованием статистических данных, так и применение математического моделирование ЦНПФ специального оснащения в целом или отдельных его узлов.

Существенное значение для реализации указанного подхода имеет терминологическая систематизация используемых понятий.

В общем понимании эффективность применения специального оснащения воздушного базирования характеризуется эффективностью, определяющей степень соответствия специального оснащения своему функциональному назначению, поставленным при создании целям.

Согласно классическому определению [1], [2] эффективность – это обобщенное понятие, характеризующее степень приспособленности техники к выполнению стоящих перед ними задач в различных условиях обстановки. Является характеристикой техники.

В прикладном значении эффективность – способность техники, включая специального оснащения, выполнять задачи по поражению объектов (целей) противника, их радиоэлектронному подавлению, минированию, разминированию, разведке, целеуказанию, наведению и другое. В качестве численного измерения эффективности [3] применяют показатель эффективности.

Показатель эффективности должен соответствовать задаче, стоящей перед средством [4]. В нашем случае таким показателем является вероятность поражения типовой одиночной или малочисленной групповой цели.

Данные показатели задаются в тактико-техническом задании на разработку средств и являются основой при их проектировании, уточняются в процессе испытаний и входят в состав основных тактико-технических характеристик образцов, принимаемых на оснащении.

Эффективность специального оснащения воздушного базирования зависит от целого ряда его свойств [5], [6] (рис. 1).

Качество специального оснащения воздушного базирования – объективная и всеобщая характеристика комплекса, обнаруживающаяся в совокупности свойств, характеризующих его приспособленность к удовлетворению потребности его использования по назначению и рассматриваемая применительно к определенным условиям создания, эксплуатации и применения [7].

Формой оценки соответствия качеств специального оснащения воздушного базирования требованиям решения задачи по поражению цели на земле и в воздухе являются ЭТХ искомого комплекса специального оснащения с учетом соответствия их ЭТХ воздушного судна.

Эксплуатационно-технические характеристики – характеристики надежности, живучести и отказоустойчивости, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности [8], [9], что соответствует структурному блоку «эксплуатационность» из состава структуры показателя качества специального оснащения воздушного базирования, представленной на рис. 1.

Подобная трактовка позволяет записать

$$W_{ЭКСПЛ}^{ПВ} = W_{ЭКСПЛ}^{ПВ}\left(W_{НАД}^{ПВ}, W_{ЖИВ}^{ПВ}, W_{ОБСЛ}^{ПВ}, W_{БГ}^{ПВ}, W_{БЕЗ.Э}^{ПВ}\right), \quad (1)$$

где $W_{НАД}^{ПВ}$, $W_{ЖИВ}^{ПВ}$, $W_{ОБСЛ}^{ПВ}$, $W_{БГ}^{ПВ}$, $W_{БЕЗ.Э}^{ПВ}$ – показатели надежности, живучести, обслуживаемости и безопасности эксплуатации образца специального оснащения воздушного базирования соответственно.

Эксплуатационность специального оснащения воздушного базирования – показатель

*Рис. 1. Схема структуры показателя качества специального оснащения воздушного базирования*

свойства (качества) специального оснащения воздушного базирования, характеризующий его способность в любом режиме эксплуатации сохранять и поддерживать исправное (работоспособное) состояние, обеспечивать быстрейшее восстановление в случае возникновения отказов и повреждений, доступный порядок обслуживания и безопасности для расчета при применении комплекса специального оснащения по назначению.

Обеспечение требуемого уровня эксплуатационности специального оснащения воздушного базирования, направленное на обеспечение его работоспособности в любых условиях применения по назначению, включает, наряду с решением задач конструктивно-технологического плана при создании специального оснащения, разработку системы эксплуатации последнего в повседневной жизнедеятельности потребителей.

Применительно к показателям выражения (1) стохастическая природа нагружения специального оснащения воздушного базирования наиболее значима для определения показателей, зависящих непосредственно от внешних воздействий, то есть $\hat{W}^{ПВ}_{НАД}$ и $\hat{W}^{ПВ}_{ЖИВ}$. Отсюда следует

$$W^{ПВ}_{ЭКСПЛ} = W^{ПВ}_{ЭКСПЛ}\left(\hat{W}^{ПВ}_{НАД}, \hat{W}^{ПВ}_{ЖИВ}\right). \qquad (2)$$

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [9].

Надежность специального оснащения воздушного базирования (см. рис. 1) включает безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость в отдельности или в каком-либо сочетании. Для характеристики надежности специального оснащения воздушного базирования могут применяться единичные (вероятность безотказной работы, наработка на отказ, назначенный ресурс, средний срок службы, среднее время восстановления, средний срок сохраняемости и другое) и комплексные (коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент операционной готовности и другое) показатели. Расчет показателей основывается на учете отказов.

Защищенность специального оснащения воздушного базирования – показатель свойства (качества) специального оснащения воздушного базирования, определяющего его неуязвимость к воздействию средств поражения противника и способность противостоять воздействию поражающих факторов техногенного и естественного происхождения в процессе эксплуатации в качестве сопрягаемого с пилотажно-навигационным комплексом оборудования воздушного судна.

Живучесть – свойство специального оснащения воздушного базирования в целом и (или)

его функциональных систем и компонентов, характеризующее способность обеспечивать завершение цикла применения по назначению в ожидаемых условиях эксплуатации при повреждениях от внешних факторов техногенного или естественного происхождения без неприемлемого вреда лицам или имуществу, предусмотренного целевым назначением комплекса специального оснащения.

Учитывая, что показатели живучести и стойкости также зависят внешних воздействий стохастической природы и влияют напрямую на надежность эксплуатации специального оснащения воздушного базирования, целесообразно также включить их в систему показателей качества. Тогда совместно с выражением (2), можно записать

$$W_{КАЧ}^{ПВ} = \\ = W_{КАЧ}^{ПВ}\left(\left\{\hat{W}_{СТ/ТЕХН}^{ПВ}, \hat{W}_{СТ/ЕСТ}^{ПВ}, \hat{W}_{НАД}^{ПВ}, \hat{W}_{ЖИВ}^{ПВ}\right\}\right). \quad (3)$$

В свою очередь в определенной степени значения показателей в данном выражении взаимозависимы, то есть

$$W_{НАД}^{ПВ} = W_{НАД}^{ПВ}\left(\hat{W}_{СТ.ТЕХН}^{ПВ}, \hat{W}_{СТ.ЕСТ}^{ПВ}\right),$$

$$W_{ЖИВ}^{ПВ} = W_{ЖИВ}^{ПВ}\left(\hat{W}_{СТ.ТЕХН}^{ПВ}, \hat{W}_{СТ.ЕСТ}^{ПВ}\right). \quad (4)$$

Тогда выражение (3) преобразуется к виду

$$W_{КАЧ}^{ПВ} = W_{КАЧ}^{ПВ}\left(\left\{\hat{W}_{НАД}^{ПВ}, \hat{W}_{ЖИВ}^{ПВ}\right\}\right). \quad (5)$$

Эффективность – свойство специального оснащения, отражающего его техническое совершенство при применении по целевому назначению. Одним из таких показателей, является вероятность выполнения специального оснащения типовой задачи по поражению искомой цели – $P_{эф\Sigma}$. Данная вероятность может быть выражена в качестве произведения вероятности выполнения целевой задачи при абсолютной надежности и живучести специального оснащения воздушного базирования (показатель исходной эффективности $P_{эф0}$, вероятности сохранения живучести специального оснащения воздушного базирования, как показателя его живучести – $P_{ЖИВ}$, вероятности надежной работы специального оснащения воздушного базирования (показателя надежности) – $P_{НАД}$.

$$P_{эф_\Sigma} = P_{эф_0} \cdot P_{НАД} \cdot P_{ЖИВ}. \quad (6)$$

Показатель надежности специального оснащения воздушного базирования может быть представлен произведением вероятности готовности специального оснащения к выполнению типовой задачи по поражению искомой цели – $K_{ГОТ}$ на вероятность безотказной работы специального оснащения за время выполнения целевой задачи – $P_{б.раб}(t)$.

$$P_{НАД} = K_{ГОТ} \cdot P_{б.раб}(t). \quad (7)$$

Показатель готовности определяет уровень технического состояния специального оснащения на момент получения команды к пуску снаряда, а вероятность безотказной работы характеризует уровень технического состояния непосредственно в момент пуска снаряда.

Однако, следует учитывать, что в ряде случаев целевая задача специального оснащения не выполняется, не смотря на полную надежность и живучесть специального оснащения, следовательно, $P_{эф0}<1$. Невыполнение целевой задачи может быть обусловлено техническим состоянием ствола пушки, ошибками средств наведения и ответными действиями противника по ликвидации надвигающейся угрозы.

В ряде случаев в качестве причины невыполнения целевой задачи специального оснащения воздушного базирования может выступать ненадежная работа материальной части специального оснащения, вследствие проведения регламентных работ, конструктивных доработок или же устранения возникших в процессе эксплуатации неисправностей. Данные случаи можно охарактеризовать свойством, входящим в надежность – ремонтопригодность. Вышеперечисленные случаи учитываются таким показателем ремонтопригодности, как установившееся значение вероятности готовности специального оснащения к применению – коэффициентом готовности $K_{ГОТ}$.

Также невыполнение целевой задачи может происходит из-за отказа пушки в процессе применения по предназначению – пуска специального оснащения. Эти случаи характеризуются безотказностью, и количественно учитываются таким показателем безотказности, как вероятность безотказной работы во время выполнения целевой задачи. Значение $P_{б.раб}(t)$ как и любой вероятности всегда меньше единицы.

Таким образом, имеем

$$P_{б.раб}(t) = P_{б.раб}(t)\left(W_{НАДt_{б.п.}}^{ПВ}\right),$$

$$K_{ГОТ} = K_{ГОТ}\left(W_{НАДt_{ЭКСП}}^{ПВ}\right), \quad (8)$$

где $W_{НАДt_{ЭКСП}}^{ПВ}, W_{НАДt_{б.п.}}^{ПВ}$ – показатели надежности специального оснащения на стадиях экс-

плуатации (за исключением применения) и непосредственно применения соответственно.

Наконец, целевая задача может быть не выполнена в ряде случаев из-за утраты пушечным вооружением вертолетного базирования работоспособности вследствие воздействия на него поражающих средств или при попадании его в нерасчетные условия эксплуатации. В этих случаях проявляется такое свойство, как живучесть. Количественно эти случаи учитываются вероятностью сохранения живучести пушечного вооружения – $P_{ЖИВ}$:

$$P_{ЖИВ} = P_{ЖИВ}\left(W^{ПВ}_{ЖИВ_t}\right), \quad (9)$$

где $W^{ПВ}_{ЖИВ_{tЭКСП}}, W^{ПВ}_{ЖИВ_{tб.п.}}$ – показатели живучести специального оснащения на этапах предстартовой подготовки и пуска специального оснащения соответственно.

Принимая во внимание все вышеперечисленное в соответствии с выражением (4) справедливо положить

$$W^{ПВ}_{НАДt_{ЭКСП}} = W^{ПВ}_{НАДt_{ЭКСП}}\left(\hat{W}^{ПВ}_{СТ.ТЕХН}, \hat{W}^{ПВ}_{СТ.ЕСТ}\right);$$

$$W^{ПВ}_{НАДt_{Б.П.}} = W^{ПВ}_{НАДt_{Б.П}}\left(\hat{W}^{ПВ}_{СТ.ТЕХН}, \hat{W}^{ПВ}_{СТ.ЕСТ}\right);$$

$$W^{ПВ}_{ЖИВt_{ЭКСП}} = W^{ПВ}_{ЖИВt_{ЭКСП}}\left(\hat{W}^{ПВ}_{СТ.ТЕХН}, \hat{W}^{ПВ}_{СТ.ЕСТ}\right);$$

$$W^{ПВ}_{ЖИВt_{Б.П.}} = W^{ПВ}_{ЖИВt_{Б.П}}\left(\hat{W}^{ПВ}_{СТ.ТЕХН}, \hat{W}^{ПВ}_{СТ.ЕСТ}\right). \quad (10)$$

Таким образом, надежность и живучесть специального оснащения воздушного базирования самым непосредственным образом влияют на эффективность применения специального оснащения в целом, а итоговые значения показателя специального оснащения следует определять исходя из условий эксплуатации с учетом стохастической природы нагружения последнего и воздушного судна в целом.

С учетом развития техники развиваются и контр-средства, снижающие эффективность применения новых разработок. При создании нового образца техники в том числе и специального оснащения необходимо обеспечивать сохранение и увеличение эффективности их применения. Следует отметить, что при использовании в исследованиях сложных показателей с особой остротой встает вопрос о корректности (точности) расчета частных показателей (эффективности, стоимости), так как от этого зависит правильность выбора рационального решения. Рассмотрение свойств в качестве обобщенных показателей эффективности образцов техники позволит повысить качество сравнительных оценок эффективности образцов техники (в том числе и с зарубежными аналогами); обоснования облика перспективных образцов техники и путей модернизации образцов техники, стоящих на оснащении; технико-экономического обоснования целесообразности разработки (модернизации) образцов техники.

**Библиографический список**

1. *Сердюков А. Э.* Военный энциклопедический словарь / МО РФ. Федерации. М.: Воениздат, 2007. 831 с.

2. *Рогозин Д. О.* Война и мир в терминах и определениях. Военно-политический словарь. М.: Вече, 2011. 640 с.

3. *Вентцель Е. С.* Исследование операций. М.: Высш. школа, 1975. 208 с.

4. ГОСТ РВ 29.00.002-2005. Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Эргономическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2005. 19 с.

5. Энциклопедический словарь / Министерство Обороны Российской Федерации. URL: http://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/dictionary/list.htm (дата обращения: 10.11.2021).

6. ГОСТ 56111 2014. Интегрированная логистическая поддержка экспортируемой продукции военного назначения. Номенклатура показателей эксплуатационно-технических характеристик. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.

7. ГОСТ 56136 2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 16 с.

8. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 30 с.

9. *Охромеева С. Ф.* Военный энциклопедический словарь. М.: Воениздат, 1986. 863 с.

**УДК 529.17.06** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-158**

***М. С. Лебедева****
*магистрант*
***С. Ф. Скорина****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННЫХ МОМЕНТОВ В ДВУХОСНОМ ГИРОСКОПИЧЕСКОМ СТАБИЛИЗАТОРЕ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

*Рассмотрены инерционные моменты, действующие по осям подвеса платформы в двухосном силовом гироскопическом стабилизаторе, обусловленные движением объекта по пересеченной местности и по дорогам низкого качества. Указанные условия определяют наличие значительных угловых скоростей и угловых ускорений, а также угловых колебаний транспортного средства. Приводятся расчетные соотношения по определению инерционных моментов.*
***Ключевые слова:*** *инерционные моменты, двухосный гироскопический стабилизатор, пересеченная местность.*

***M. V. Lebedeva****
*Postgraduate Student*
***S. F. Skorina****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# ESTIMATION OF INERTIAL MOMENTS IN A GYROSCOPIC STABILIZER FOR VEHICLES TRAVELING ON ROUGH TERRAIN

*The inertial moments acting along the suspension axes of the platform in a biaxial power gyroscopic stabilizer caused by the movement of the object over rough terrain and on roads of poor quality are considered. These conditions determine the presence of significant angular velocities and angular accelerations, as well as angular vibrations of the vehicle. The calculated relations for the determination of inertial moments are given.*
***Keywords:*** *inertial moments, biaxial gyroscopic stabilizer, rough terrain.*

При расчете параметров двухосных гироскопических стабилизаторов (ДГС), предназначенных для иммобилизации пострадавшего во время транспортировки в медицинское учреждение необходимо учитывать инерционные моменты [1]. Последние обусловлены целым рядом обстоятельств, из которых необходимо выделить следующие:

– значительные массогабаритные характеристики стабилизируемой платформы с пострадавшим. Даже при использовании современных конструктивным материалов с малым удельным весом для изготовления платформы и рамы ДГС, а также в случае применении схемы обращенного карданова подвеса не представляется возможным в значительной степени минимизировать моменты инерции. При этом минимизация массогабаритных характеристик пострадавшего, который располагается на платформе ДГС, принципиально невозможна;

– транспортировка пострадавшего может осуществляться не только по дорогам, но и по бездорожью и перечерченной местности, либо по грунтовым и проселочным дорогам, которые не отличаются высоким качеством дорожного покрытия. Последнее обстоятельство с учетом естественного стремления минимизировать время в пути определяет высокое значение скорости перемещения транспортного средства и достаточно высокочастотные угловые колебания транспортного средства со значительными угловыми скоростями и ускорениями.

Актуальность точного учета возникающих инерционных моментов при расчете цепей раз-

грузки рассматриваемого ДГС, в частности, параметров стабилизирующих двигателей, обусловлена также следующими соображениями. Стабилизатор для построения устройства иммобилизации с учетом массогабаритных характеристик платформы с пострадавшим по сути является силовым. Возможное применение в нем в качестве чувствительных элементов микромеханических датчиков угловых скоростей и линейных ускорений, конструктивно объединенных в инерциальный модуль позволяет классифицировать такой гиростабилизатор как индикаторный. В таких стабилизаторах задача компенсации возмущающих моментов возлагается исключительно на стабилизирующие двигатели.

По данным Федерального дорожного агентства (Росавтодора) только половина российских федеральных, соединительных и региональных дорог могут характеризоваться, как хорошие. Остальные 50 % составляют так называемы дороги с удовлетворительным и плохим качеством, а также «убитые» дороги. Протяженность последних оценивается в 50 000 км. Сведения о процентном соотношении указанных типов дорог приведены в табл. 1 [2], [3]. При этом в таблице отсутствуют сведения о дорогах, которые находятся в ведении местных органов власти и по понятным причинам в большинстве не отличаются высоким качеством.

*Таблица 1*

**Процентное соотношение и протяженность автомобильных дорого Российской Федерации**

| Оценка состояния | Федеральные | Соединительные | Региональные |
|---|---|---|---|
| Хорошо | 46 | 49 | 48 |
| Удовлетворительно | 53 | 40 | 38 |
| Плохо | 1 | 41 | 17 |

Естественное требование минимизации времени транспортировки пострадавших в медицинское учреждение определяет максимально допустимую скорость движения транспортного средства по кратчайшему маршруту, который может включать участки бездорожья, пересеченной местности или дорог низкого качества. Учет качества дороги при этом во внимание не принимается. Причинами высокой летальности пострадавших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) являются временной фактор (поздно начатая медицинская помощь в стационаре) – правило «золотого часа». По данным Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий в течение первого часа после ДТП погибает около 60 % пострадавших; а среди доставленных в стационар и впоследствии погибших 75 % умирает в первые сутки.

Для высокоманевренных объектов, к которым в названных условиях применения, без сомнения, относится транспортное средство (автомобиль) с ДГС для иммобилизации пострадавшего, будут характерны значительные угловые эволюции относительно трех осей с амплитудами до 30 градусов, характеризующихся угловыми скоростями до десятков градусов в секунду и угловыми ускорениями до десятков град/с$^2$, частота колебаний до 15 Гц.

В ДГС, построенном на микромеханическом инерциальном блоке, который выдает информацию о двух проекциях вектора угловой скорости вращения основания и двух проекциях вектора линейного ускорения, уравновешивание инерционных и прочих внешних моментов должно полностью обеспечиваться стабилизирующими двигателями. Поэтому определение величин инерционных моментов в случае комплексных внешних воздействиях, обусловленных траекторным движением транспортного средства в условиях некачественных дорог или их отсутствия, является актуальным и значимым при проектировании цепей разгрузки, а именно выбора стабилизирующих двигателей.

Кинематическая схема ДГС и системы координат связанная с транспортным средством Oxyz, с рамой карданова подвеса – Ox1y1z1, с платформой, на которой размещают пострадавшего, – Ox2y2z2 приведены на рис. 1.

Движения рамы и платформы Д ГС описывается уравнениями Эйлера [4]:

$$\begin{aligned} J_{y1}\dot{\omega}_{y1} + (J_{x1} - J_{y1})\omega_{x1}\omega_{z1} &= M^{P}_{y1} + M^{СД}_{y1}; \\ J_{x2}\dot{\omega}_{x2} + (J_{z1} - J_{z1})\omega_{y2}\omega_{z2} &= -M^{P}_{x2}; \\ J_{y2}\dot{\omega}_{y2} + (J_{x2} - J_{z2})\omega_{x2}\omega_{z2} &= -M^{P}_{y2}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $J$ – моменты инерции; $\omega$ – угловые скорости; $x$ – угловые ускорения вокруг соответствующих

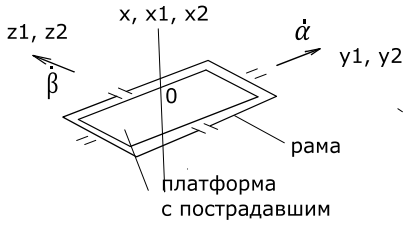



*Рис. 1. Кинематическая схема ДГС*

осей имеют индексы этих осей; *Mпр* – момент реакций со стороны платформы на раму подвеса в проекции на соответствующую ось; *M* – момент, создаваемый стабилизирующим двигателем вокруг оси O*y*1. Первые и вторые слагаемые в этих уравнениях являются инерционными, вторые – гироскопическими моментами.

Момент реакции платформы на раму по оси ее подвеса определяется следующим соотношением:

$$M_{y1}^{П-Р} = -(\mathrm{J}_{x2}\,\dot{\omega}_{x2} + (\mathrm{J}_{z2} - \mathrm{J}_{y2})\omega_{y2}\omega_{z2}) \times$$
$$\times \sin\beta - (\mathrm{J}_{y2}\,\dot{\omega}_{y2} + (\mathrm{J}_{x2} - \mathrm{J}_{z2})\omega_{x2}\omega_{z2}.$$

Момент стабилизирующего двигателя по оси подвеса рамы

$$M_{y1}^{СД} = J_{y1}\dot{\omega}_{y1} + (\mathrm{J}_{x1} - \mathrm{J}_{z1})\omega_{x1}\omega_{z1} +$$
$$+J_{x2}\dot{\omega}_{x2}\sin\beta + J_{y2}\dot{\omega}_{y2}\cos\beta + (\mathrm{J}_{z2} - \mathrm{J}_{y2}) \times$$
$$\times\omega_{y1}\omega_{z2}\sin\beta + (\mathrm{J}_{x2} - \mathrm{J}_{z2})\omega_{x2}\omega_{z2}\cos\beta. \qquad (2)$$

Кинематические уравнения для двухосного ГС, известны и имеют вид:

$$\omega_{z2} = \omega_{z1} + \dot{\beta}; \omega_{x2} = \omega_{x1}\cdot\cos\beta + \omega_{y1} \times$$
$$\times\sin\beta; \omega_{y2} = \omega_{yq}\cdot\cos\beta - \omega_{x1}\cdot\sin\beta. \qquad (3)$$

Для высокодинамичных объектов, каковым является специализированное транспортное средство, перемещающееся в условиях плохих дорог, значения собственных скорости дрейфа ДГС представляются величинами существенно меньшими по сравнению с угловыми скоростями основания. Если угловые скорости и угловые ускорения платформы малы по сравнению с угловыми скоростями и ускорениями основания, $\omega_{z2} \to 0, \omega_{y2} \to 0, \dot{\omega}_{z2} \to 0, \dot{\omega}_{y2} \to 0$ то получаем

$$\dot{\omega}_{y1} = \dot{\omega}_{x1}\cdot tg\beta - \frac{\omega_{x1}\omega_{z1}}{\cos^2\beta};$$

$$\dot{\omega}_{x2} = \frac{\dot{\omega}_{x1}}{\cos\beta} - \frac{\omega_{x1}\omega_{z1}}{\cos^2\beta}\sin\beta. \qquad (5)$$

Тогда с учетом выражений (2), (3) и (5) инерционный момент рамы по оси подвеса будет определяться выражением следующего вида:

$$M_{z1}^{И} = -(\mathrm{J}_{y2} - \mathrm{J}_{x2})\frac{\omega_{x1}\omega_{y2}}{\cos\beta}, \qquad (6)$$

Считая $\omega_{z2} = 0$ и пренебрегая величинами второго порядка малости относительно $\omega_{y2}$ инерционные моменты платформы определяются соотношением

$$M_{z1}^{И} = -(\mathrm{J}_{y2} - \mathrm{J}_{x2})\frac{\omega_{x1}\omega_{y2}}{\cos\beta},$$

где $\omega_{y2}$ – угловая скорость дрейфа платформы.

С учетом кинематической связи угловых ускорений и угловые скорости платформы и рамы ДГС с угловыми скоростями транспортного средства инерционный момент вокруг оси рамы подвеса будет иметь вид:

$$M_{y1}^{И} = -B\mathrm{tg}\beta(\dot{\omega}_x\cos\alpha - \dot{\omega}_z\sin\alpha +$$
$$+\dot{\omega}_y(\omega_x\sin\alpha + \omega_z\cos\alpha)) +$$
$$+\frac{A}{2}((\omega_x^2 - \omega_z^2)\sin 2\alpha + 2\omega_x\omega_z\cos 2\alpha), \qquad (7)$$

где

$$B = J_{y1} + J_{x2};$$
$$A = J_{z1} + \frac{J_{y1}}{\cos\beta} + (B + J_{x2})tg^2\beta - J_{x1}.$$

Величина инерционного момента определяется не только значениями моментов инерции рамы и платформы, угловых скоростей и ускорений объекта, но и углами поворота платформы относительно ее осей подвеса $\alpha$ и $\beta$. Анализ структуры и состава выражения (7) позволяет предположить существование экстремума (максимума) значения момента при некоторой величине и знаке углов поворота рамы и платформы. Пренебрежение указанным обстоятельством может привести к некорректному выбору мощности стабилизирующего двигателя, неполной компенсации возмущающих моментов, возникновению не регламентированных техническим заданием отклонений платформы с пострадавшим от плоскости горизонта и, как следствие, к ухудшению качества иммобилизации.

При движении транспортного средства в условиях бездорожья с большими скоростями в существенный вклад в значение инерционного момента будет вносить составляющая, определяемая малыми колебаниями с высокой частотой. Это определяется большими значениями амплитуд угловых скоростей и ускорений.

При допущении гармонического характера угловых колебаний транспортного средства вокруг трех осей с одинаковой частотой *m* выражения для соответствующих угловых скоростей и угловых ускорений имеют вид:

$$\omega_x = am\cdot\cos(mt);\ \omega_y = bm\cdot\cos(mt);$$

$$\omega_z = cm \cdot \cos(mt);\ \dot{\omega}_x = -am^2 \cdot \sin(mt);$$
$$\dot{\omega}_z = -cm^2 \cdot \sin(mt), \quad (8)$$

где ν – круговая частота колебаний объекта.

С учетом соотношений (8) выражения для постоянной и переменной составляющих инерционного момента при гармонических угловых колебаниях транспортного средства будут иметь вид:

$$M_{y1}^{Иconst} = -\frac{Bm^2}{2} b \cdot tg\beta(a\sin\alpha + c\cos\alpha +$$
$$+\frac{Am^2}{4}((a^2 - c^2)\sin 2\alpha + 2ac \cdot \cos 2\alpha);$$
$$M_{y1}^{И\,\mathrm{var}} = -Bm^2 b \cdot tg\beta(c\sin\alpha - a\cos\alpha)\sin mt -$$
$$-\frac{1}{2}(Bm^2 b \cdot tg\beta(a\sin\alpha + c\cos\alpha) -$$
$$-\frac{Am^2}{2}((a^2 - c^2)\sin 2\alpha + 2ac \cdot \cos 2\alpha))\cos 2mt,$$

где $M_{y1}^{Иconst}$ и $M_{y1}^{И\,\mathrm{var}}$ – постоянная и переменная составляющие инерционного момента.

Суммарный инерционный момент по оси $Oy1$ определяется следующим выражением

$$M_{y1}^{И} = -\dot{\omega}_{x1}\mathrm{tg}\beta(J_{y1} + J_{x2}),$$
$$M_{y1}^{И} = -\dot{\omega}_{x1}\mathrm{tg}\beta(J_{y1} + J_{x2}).$$

Полученные соотношения для инерционных моментов ДГС, возникновение которых определено не только массогабаритными параметрами гиростаблизатора, но и условиями применения по назначению транспортного средства для транспортировки пострадавшего, позволяют уточнить требования по мощности к исполнительным элементам цепей разгрузки – стабилизирующим двигателям. В результате удастся обеспечить необходимое качество иммобилизации пострадавшего во время его транспортировки и тем самым обеспечить существенное увеличение процента пострадавших, которые успешно перенесли транспортировку в ближайшее медицинское учреждение (выжили).

**Библиографический список**

1. *Скорина С. Ф., Лебедева М. С.* Двухосный гиростабилизатор для иммобилизации пострадавшего при транспортировке // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Вторая Междунар. науч. практ. конф., СПб., 2021. С. 216–218.

2. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). URL: https://rosavtodor.gov.ru/ (дата обращения: 29.11.2021).

3. Автострада. Актуальное состояние автомобильных дорог. URL: https://autostrada.info/ru (дата обращения: 29.11.2021).

4. *Колосов Ю. А., Ляховецкий Ю. Г., Рахтеенко Е. Р.* Гироскопические системы: Проектирование гироскопических систем. Ч. II: Гироскопические стабилизаторы / Под ред. Д. С. Пельпора. М.: Высш. школа, 1977. 223 с.

5. *Арсеньев В. Д., Рахтеенко В. Р.* Расчет максимальных значений инерционных моментов в гироскопических стабилизаторах для маневренных объектов // Наука и инновации. 2013. № 2 (14). URL: http:// engjournal.ru/catalog/it/nav/554.html (дата обращения: 11.09.2021).

**УДК 62-521** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-162**

***М. Е. Иванов****
*аспирант*
***В. В. Езерский****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИМ АППАРАТОМ ПО КАНАЛУ РЫСКАНЬЯ В MATLAB SIMULINK

*Рассмотрен пример использования пакета Simulink в Matlab для моделирования управления углом рыскания низколетящего аппарата типа экраноплан-экранолет тяжелого класса. Управление осуществляется на высоте полета 6 м, то есть на средней высоте полета в пределах действия экранного эффекта*
***Ключевые слова:*** *тяжелый экраноплан, угол рысканья, канал управления, система управления.*

***M. E. Ivanov****
*Postgraduate Student*
***V. V. Yezersky****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# MODELING THE OPERATION OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR A LOW-FLYING VEHICLE ALONG THE YAW CHANNEL IN MATLAB SIMULINK

*An example of using the Simulink package in Matlab for modeling the control of the yaw angle of a low-flying vehicle of the type WIG-craft/half-plane of a heavy class is considered. Control is carried out at a flight altitude of 6 m that is, at an average flight altitude within the range of the ground effect*
***Keywords:*** *heavy WIG-craft, yaw angle, control channel, control system.*

В настоящее время Россия, как известно, активно держит курс на освоение Арктической зоны и расширение присутствия в данном регионе, богатом полезными ископаемыми. В свою очередь это порождает множество довольно оригинальных идей и перспективных технических решений, связанных с этим направлением. Одним из таких предложений является использование многоцелевого тяжелого экраноплана-экранолета, небольшая высота полета которого теоретически приемлема как в условии равнинной сухопутной тундры, так и в водах Северного Ледовитого океана [1]. Многоцелевым такой ЛА делают следующие возможности:

а) использование в качестве стартовой платформы (первой ступени) для многоразового воздушно-космического самолета горизонтального взлета и посадки;

б) логистическая функция – перевоз больших запасов грузов и продовольствия между труднодоступными арктическими поселениями, со многими из которых отсутствует даже автомобильное сообщение, и которые располагаются на больших расстояниях друг от друга;

в) работа во время поисково-спасательных операций, когда необходимо в кратчайшие сроки добраться до места происшествия, поскольку крейсерская скорость полета экраноплана примерно в два раза выше скорости вертолета [2].

Одной из важнейших задач, предъявляемых к эксплуатации такого ЛА, является его управление и навигация в нормальных условиях с наивысшими критериями безопасности полета. По сути, задача управления основана на измерении основных летных параметров: угла тангажа $\vartheta$ и крена $\gamma$, высоты полета h, вертикальной скорости $\dot{h}$ и путевой скорости V. В то же время основной навигационной задачей является: управление углом рысканья $\psi$, контроль угла скольжения $\beta$ и угла сноса $\beta_C$.

В управлении высотным и низколетящим ЛА существует принципиальная разница: в то время, как на большой высоте самолет может совершить достаточно большой крен для наиболее быстрого и эффективного поворота, экраноплан, летящий с помощью подъемной силы экрана на высоте в несколько метров, такого себе позволить не может. Даже небольшой крен

на такой высоте может привести к риску задеть неровность подстилающей поверхности и аварийной ситуации [4]. И хотя при полете на высотах сопоставимых экранолету жесткие ограничения на крен уже не будут актуальны, управление углом крена на низколетящем аппарате в пределах действия экранного эффекта осуществляется в крайне узком диапазоне. Поэтому и поворот его будет совершаться по большей части за счет рысканья, в таком случае управление углом рысканья для решения задачи поворота станет наиболее приоритетным.

Система уравнений движения по каналу рысканья $\psi$ выглядит следующим образом:

$$I_y\Delta\ddot{\Psi} + M_{y_0}^{\beta}\Delta\beta + M_{y_0}^{\omega_y}\Delta\omega_y = -M_{y_0}^{\delta_H}\Delta\delta_H + M_{BY},$$

$$mV_0(\Delta\dot{\Psi} - \Delta\dot{\beta}) + Z_0^{\beta}\Delta\beta = F_{BZ}, \qquad (1)$$

где $M_{BY}$ и $F_{BZ}$ – возмущающие момент и сила, которые действуют относительно вертикальной и вдоль боковой осей $Y$ и $Z$ соответственно; $I_y$ – момент инерции ЛА относительно оси $Y$; $\psi$ и $\beta$ – углы рысканья и скольжения; $\Delta\delta_H$ – угол отклонения руля направления; $V_0$ – начальная скорость; $M_{y_0}^{\omega_y}$ – момент статической устойчивости по каналу скольжения; $M_{y_0}^{\omega_y}\Delta\omega_y = -(\frac{\partial M_y}{\partial\omega_y})_0$ – момент демпфирования рысканья; $M_{y_0}^{\delta_H}\Delta\delta_H = -(\frac{\partial M_y}{\partial\delta_H})_0$ – управляющий момент направления; $Z_0^{\beta} = -(\frac{\partial Z}{\partial\beta} + P\cos\beta)_0$ – момент боковой аэродинамической силы по углу скольжения.

Как уже отмечалось выше, низколетящий аппарат должен иметь ничтожно малый угол крена, поэтому его скольжение отсутствует, то есть $\Delta\beta = \Delta\psi$. Систему уравнений (1) можно привести к виду:

$$I_y\Delta\ddot{\Psi} + M_{y_0}^{\beta}\Delta\psi + M_{y_0}^{\omega_y}\Delta\dot{\psi} = -M_{y_0}^{\delta_H}\Delta\delta_H + M_{BY}. \qquad (2)$$

Чтобы промоделировать траекторию инерции ЛА при повороте, необходимо наложить ограничение на максимальную скорость изменения курса

$$\Delta\psi = \frac{-M_{y_0}^{\delta_H}\Delta\delta_H + M_{BY} - M_{y_0}^{\omega_y}\Delta\dot{\psi} - I_y\Delta\ddot{\psi}}{M_{y_0}^{\beta}} = f(\Delta\delta_H, M_{BY}),$$

$$\dot{\psi} = \frac{\Delta\psi}{\Delta\tau} \approx \frac{d\psi}{d\tau}. \qquad (3)$$

Теперь необходимо выставить начальные данные для моделирования и определить с его

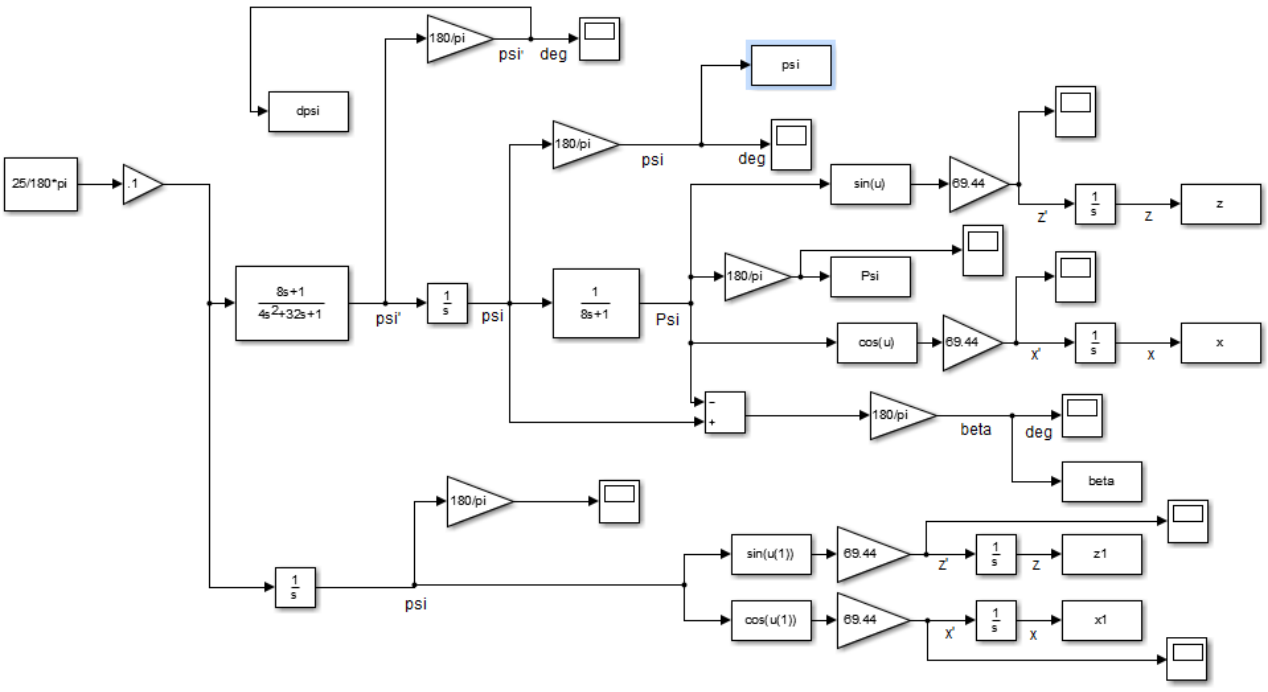



*Рис. 1. Схема моделирования измерения угла поворота траектории $\Psi$ и угловой скорости $\dot{\psi}$, угла рысканья $\psi$ и угла скольжения $\beta$ с учетом запаздывания реальной динамики изменения рысканья (в Matlab Simulink)*

помощью скорость поворота экраноплана. Уравнения 1–3 можно привести к системе дифференциальных уравнений:

$$\dot{\Psi} = b_4\beta + f_z, \quad \psi = \Psi + \beta,$$

$$x = V\cos\Psi_Z, \quad \Psi_Z = V\sin\Psi. \qquad (4)$$

Передаточные функции каналов управления имеют вид:

$$W_\Psi^{\delta_H} = \frac{k_C}{(T_C^2 s^2 + 2T_C\xi s + 1)s} \text{ и } W_\Psi^{\psi} = \frac{1}{T_{1C}s + 1}. \qquad (5)$$

Схема для моделирования измерения угла рысканья, угловой скорости, угла поворота траектории и угла скольжения β представлена на рис. 1. Данная схема является общей и позволяет использовать любые начальные данные максимального угла отклонения руля направления, скорости движения экраноплана, времени полета, а также коэффициентов передаточных функций звеньев управления в цепи.

Перед моделированием были заданы дополнительные начальные данные:

1) до начального момента времени $t = 0$ экраноплан летит горизонтально со скоростью $V = 250$ км/ч, малые изменения высоты не влияют на динамику бокового движения, поэтому ими можно пренебречь. При $t = 0$ руль направления отклоняется на максимальную величину $\Delta = 25°$;

2) для исследования запаздывания выполнения команд САУ в модель введен второй (параллельный) канал измерения наряду с основным. Первый канал учитывает реальную динамику, а второй использует кинематические уравнения, которые предполагают начало поворота сразу после отклонения руля направления;

3) время моделирования будет составлять 100 сек., теоретическая траектория полета ЛА за это время – окружность с некоторым радиусом.

После подстановки данных значений в параметры блоков схемы по результатам моделирования были получены графики на рис. ниже.

Как видно из графиков, в модели САУ по каналу рысканья ψ данный угол поворота траектории Ψ в течение первых 100 сек. полета возрастает не так быстро, как угол рысканья ψ ввиду запаздывания действия системы после поворота руля. Запаздывание составляет примерно 10 ° на сотой секунде моделирования.

На рис. 5 показано изменение угла скольжения в начале полета. Поскольку наиболее быстро поворот ЛА осуществляется при помощи момента, создаваемого поворотом руля направ-

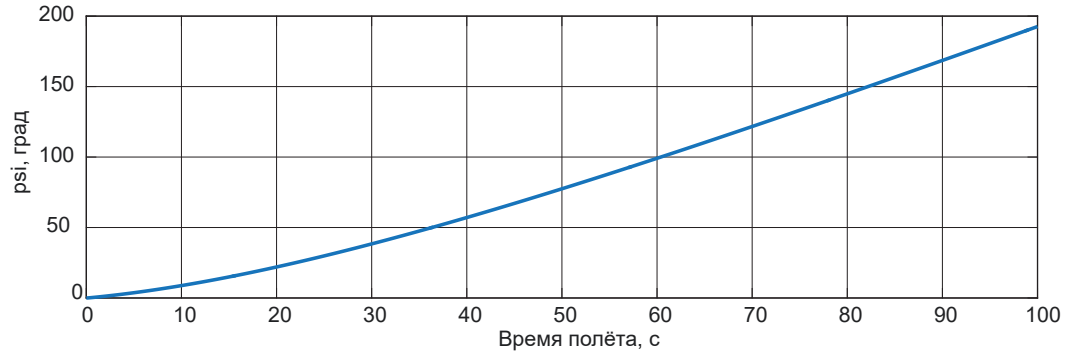



*Рис. 2. Динамика изменения угла рысканья в течение первых 100 сек. полета*

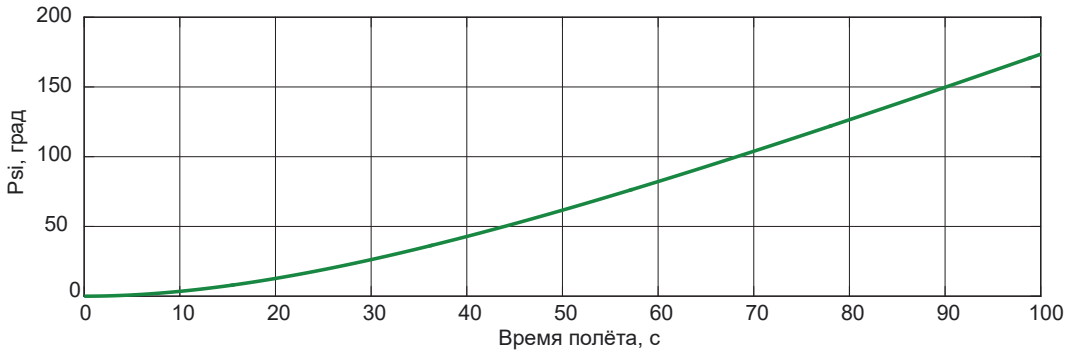



*Рис. 3. Угол поворота траектории Ψ в течение первых 100 сек. полета*

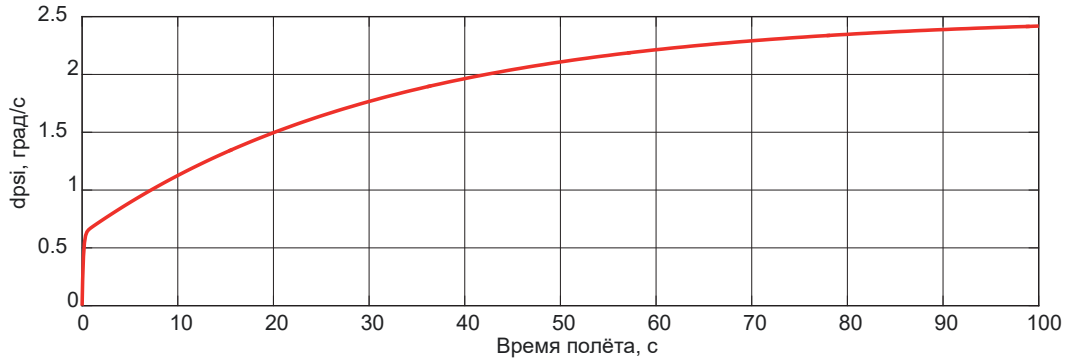



*Рис. 4. Изменение угловой скорости по каналу рысканья ( $\dot{\psi}$ )*

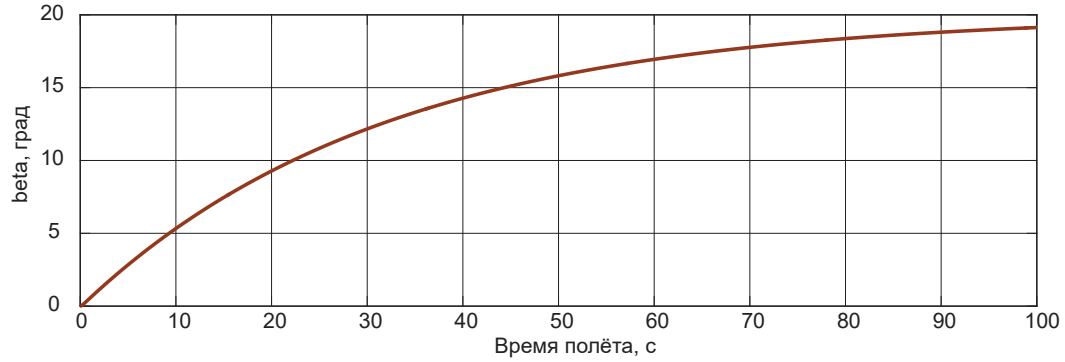



*Рис. 5. Изменение угла скольжения β в течение первых 100 сек. полета*

ления, побочным явлением становится возникновение скольжения, бокового аналога угла атаки: данная боковая сила стремится искривить траекторию полета, поэтому является нежелательным эффектом с точки зрения безопасности полета. Таким образом, на рисунке видно, что резкое возрастание скольжения, которое имело место поначалу, постепенно выравнивается – происходит стабилизация ЛА.

В заключение следует добавить, что характер изменения замеряемых параметров будет разным в зависимости от заданных начальных данных. К тому же с помощью самой схемы измерения можно вычислить дополнительные летные характеристики, например, радиус траектории полета – окружности, а также угловое ускорение.

## Библиографический список

1. Сетевое издание «Военное обозрение». URL: https://topwar.ru/144996-borisov-rossiya-budet-stroit-boevye-ekranoplany.html (дата обращения: 30.07.2018).

2. *Сайфуллин Т. И., Ганин С. М.* Морской старт космических аппаратов с использованием тяжелых экранопланов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Серия: Электротехника, электронная техника, информационные технологии. 2010. С. 305–306.

3. *Небылов А. В.* Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. СПб.: ГУАП, 1994. 275 с.

4. *Белавин Н. И.* Экранопланы. Л.: Судостроение, 1977. С. 5–20.

**УДК 62-835** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-166**

***Н. А. Овчинникова****
*кандидат технических наук, доцент*
***П. А. Назаренко****
*ассистент*
***В. И. Сатарова****
*студентка*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТИПА КВАДРОКОПТЕР И МОДЕЛИРОВАНИЕ В MATLAB SIMULINK

*Стремительное развитие аэрокосмической отрасли требует повышенной точности и надежности разрабатываемых решений и приборов. Составление математических моделей позволяет произвести эффективную оценку показателей состояния различных систем и устройств, а также оценить их поведение, в зависимости от необходимых заданных условий. В случае с мультироторными беспилотными авиационными системами типа квадрокоптер одной из важнейших характеристик является емкость используемого аккумулятора, от которого зависят возможные эксплуатационные условия, продолжительность полета и работа системы в целом. В статье рассматривается пример построения математической модели динамики квадрокоптера с последующим моделированием полученной системы в пакете MATLAB Simulink, которая учитывает расход заряда емкости аккумулятора при работе двигателей.*
***Ключевые слова:*** *беспилотные авиационные системы, квадрокоптер, двигатели, емкость, аккумуляторная батарея, математическая модель, моделирование.*

***N. A. Ovchinnikova****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***P. A. Nazarenko****
*Assistant*
***V. I. Satarova****
*Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# MATHEMATICAL MODEL OF THE ENGINE OF AN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEM AS A QUADCOPTER TYPE AND SIMULATION IN MATLAB SIMULINK

*The rapid development of the aerospace industry requires increased accuracy and reliability of the solutions and instruments being developed. Compilation of mathematical models makes it possible to effectively assess the indicators of the state of various systems and devices, as well as assess their behavior, depending on the necessary specified conditions. In the case of multi-rotor unmanned aerial systems such as a quadcopter, one of the most important characteristics is the capacity of the battery used, on which the possible operating conditions, the duration of the flight and the operation of the system as a whole depend. The article considers an example of constructing a mathematical model of the dynamics of a quadcopter with subsequent modeling of the resulting system in the MATLAB Simulink package, which takes into account the consumption of the battery capacity when the engines are running.*
***Keywords:*** *unmanned aerial systems, quadcopter, engines, capacity, battery, mathematical model, modeling.*

## Введение

Создание новых сложных и больших технических систем неразрывно связано с совершенствованием и развитием методов обеспечения требуемого уровня точности и надежности, начиная от разработки требований, технических условий на проектирование и производство, заканчивая комплексными испытаниями и эксплуатацией [1].

В инженерной деятельности аэрокосмической отрасли использование математических моделей на этапе разработки позволяет не только оценить показатели системы, но и улучшить их путем внедрения дополнительных алгоритмов расчета определенных характеристик.

Долговечность аккумуляторной батареи – важная характеристика для любого квадрокоптера. Высокая автономность обеспечивает беспилотнику длительную продолжительность полета, позволяет снимать фото и видео, а также обеспечивает работу всех сопутствующих и дополнительно установленных систем.

В настоящий момент среднее время работы дрона без подзарядки не является высоким, составляет, как правило, около 20–35 мин. [2].

В зависимости от веса квадрокоптера, установленных двигателей, условий и целей эксплуатации варьируется выбор моделей АКБ. Обязательным условием продления срока пиковой производительности аккумулятора является соблюдение правил, предписанных производителем.

Актуальной проблемой является существенное снижение заряда при низких температурах.

## Математические модели и квадрокоптеры

Представляет собой совокупность свойств исследуемого объекта, перечисляемых в соответствии с определениями сопутствующих математических правил с последующим выводом этих свойств в соответствии строгими правилами. Таким образом, исходя из количественных и пространственных соотношений математика становится предметом современного изучения.

В аэрокосмической отрасли наука математики является фундаментальной и неотъемлемой части для разработки, испытаний и эксплуатации летательного аппарата любого типа.

Вопрос влияния емкости используемого аккумулятора на работу квадрокоптера является критичным фактором.

## Математическая модель двигателя квадрокоптера

Для исследования работы квадрокоптера составляется математическая модель двигателей. Она состоит из системы дифференциальных уравнений механической и электрической составляющей для каждого двигателя [3].

При совершении перемещения квадрокоптером работа его двигателей расходует заряд установленного аккумулятора. Характерным критерием АКБ является время его работы.

При перемещении квадрокоптера по оси OX на некоторое расстояние $s$ за время $t$ расходуется следующее количество заряда:

$$Q = \frac{P \times t\,[ч]}{U_{акб}}, \qquad (1)$$

где $U_{акб}$ – номинальное напряжение батареи; $P$ – мощность ДПТ.

Тогда остаточный заряд (емкость) аккумулятора можно определить как разность:

$$C^* = C_{ном} - Q, \qquad (2)$$

где $C_{ном}$ – номинальная емкость АКБ.

Полученную математическую модель двигателей можно представить в виде системы:

$$\begin{cases} \frac{dI_1}{dt} = \frac{U_1 - RI_1}{L}; \quad \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_M \Phi I_1 - \mu\omega_1 - M_{св1}}{J}; \\ \frac{dI_2}{dt} = \frac{U_2 - RI_2}{L}; \quad \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{C_M \Phi I_2 - \mu\omega_2 - M_{св2}}{J}; \\ \frac{dI_3}{dt} = \frac{U_3 - RI_3}{L}; \quad \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{C_M \Phi I_3 - \mu\omega_3 - M_{св3}}{J}; \\ \frac{dI_4}{dt} = \frac{U_4 - RI_4}{L}; \quad \frac{d\omega_4}{dt} = \frac{C_M \Phi I_4 - \mu\omega_4 - M_{св4}}{J}; \\ Q = \frac{P \times t\,[ч]}{U_{акб}}; \\ C^* = C_{ном} - Q. \end{cases} \qquad (3)$$

Стоит отметить, что точность и количество учитываемых параметров зависит от требований представленного на реализацию технического задания.

Представленную математическую модель можно прорабатывать и дополнять, учитывая различные сторонние факторы, влияющие на работу аккумулятора и двигателей квадрокоптера.

## Моделирование математических моделей в пакете прикладных программ MatLab

Использование возможностей MATLAB в области моделирования систем различных летательных аппаратов достаточно высоки для получения оценки динамических и качественных характеристик.

При моделировании математической модели динамики квадрокоптера, учитывающей расход аккумулятора при работе двигателей использовался встроенный Simulink, позволяющий создать полную модель работы двигателей и учет расхода заряда аккумулятора выбранного типа БАС.

По представленным уравнениям в математической модели была составлена имитационная модель на рис. 1.

При запуске процесса моделирования были получены графики для угловой скорости вращения винтов и график определение расхода

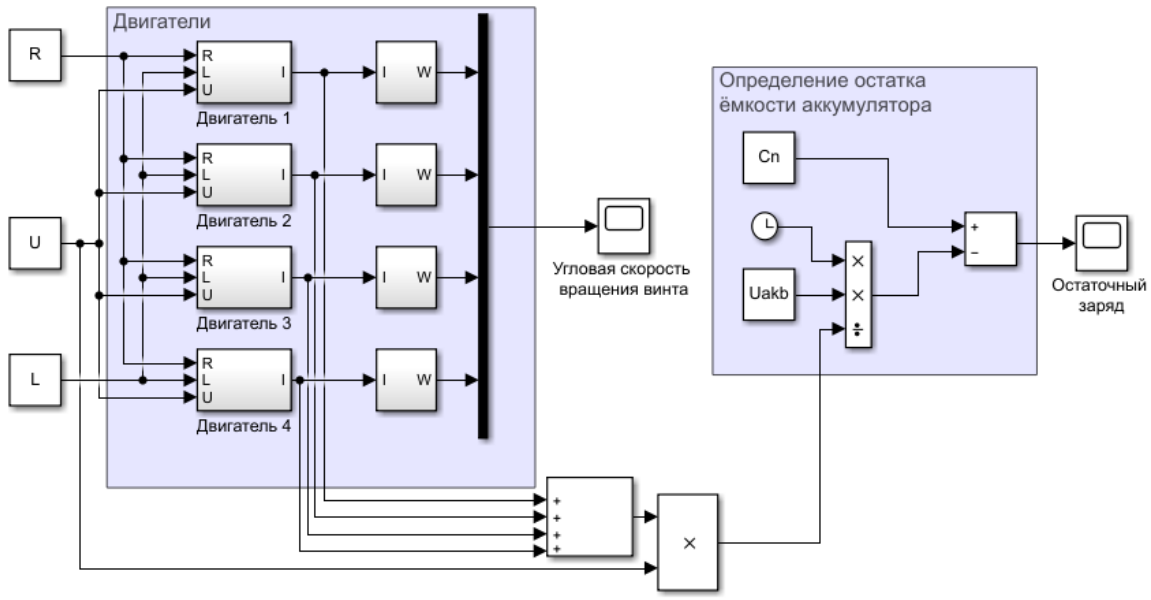



*Рис. 1. Модель работы двигателей и определение остатка емкости аккумулятора*

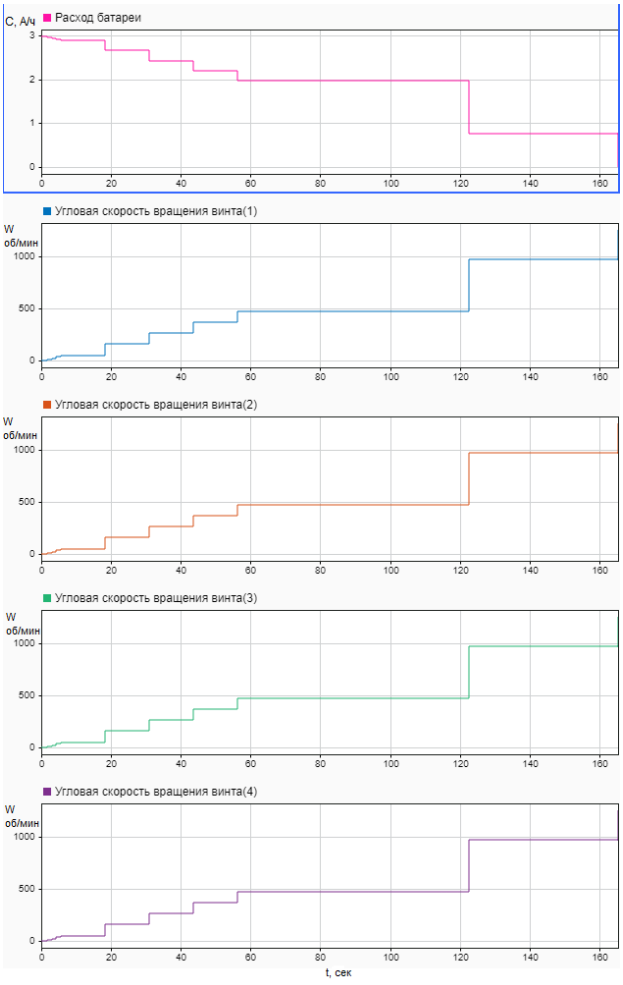



*Рис. 2. Результаты моделирования, представленные в виде графиков*

заряда аккумуляторной батареи, представленные на рис. 2.

При работе с данной моделью можно получить графики не только представленных выходных параметров, в зависимости от поставленной задачи можно вывести необходимые по требованию.

В качестве исходных данных для активного сопротивления обмотки статора, управляющего напряжения, поступающее на вход двигателя, и тока в обмотке статора были приняты следующие значения:

$$R = 0.68 \quad Ом; \quad U = 10.19 \quad B; \quad I = 14.84 \quad A.$$

Характеристиками аккумуляторной батареи были приняты следующие параметры:

*Номинальная ёмкость АКБ* :

$$C_{ном} = 3 \quad A/ч;$$

*Номинальное напряжение батареи* :

$$U_{акб} = 11.10 \quad B.$$

## Заключение

Полученная математическая модель работы двигателей обладает возможностью качественного прогнозирования характеристик с дальнейшим их изменением с целью улучшения показателей, таких как дальность полета и автономность работы.

**Библиографический список**

1. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов и др.: учеб. пособие. М.: Логос, 2003. 736 с.

2. Аккумулятор квадрокоптера: сколько держит заряд и как продлить автономность// Dronnews.ru. URL: https://dronnews.ru/faq/akkumulyator-kvadrokoptera.html (дата обращения: 08.12.2021).

3. *Лысухо Г. В., Масленников А. Л.* Квадрокоптер: динамика и управление // Политехнический молодежный журнал. 2020. № 05 (46). URL: http:// dx.doi.org / 10.18698/2541-8009-2020-05-000 (дата обращения: 08.07.2021).

**УДК 629.7.05**

***А. В. Сайфуллина****
*аспирант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ПОДВИЖНУЮ ЦЕЛЬ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

*В статье рассматривается возможность решения задачи наведения беспилотного летательного аппарата на подвижную цель с применением игровой динамической задачи преследования. Описывается случай интеллектуального уклонения цели, при котором оба динамических объекта анализируют поведение друг друга и формируют оптимальный закон управления. Реализуется моделирование наведения беспилотного летательного аппарата с ограничением предельных параметров движения.*
***Ключевые слова:*** *беспилотный летательный аппарат, наведение, теория игр, моделирование.*

***A. V. Sayfullina****
*PhD Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# SIMULATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE GUIDANCE ON A MOVING TARGET WITH LIMITING ITS PARAMETRS

*The article discusses the possibility of using a dynamic game-theoretic approach for an unmanned aerial vehicle guidance on a moving target. An example of intelligent target evasion is described, in which both dynamic objects analyze each other's actions and form an optimal trajectory. The simulation assumes that the unmanned aerial vehicle has the limiting values of its parameters.*
***Keywords:*** *unmanned aerial vehicle, guidance, game theory, simulation.*

## Постановка игровой динамической задачи

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят применение во многих сферах как в военной, так и в гражданской отраслях, а повышение автономности, улучшение алгоритмов управления и методов наведения являются важными и актуальными задачами. Один из путей решения задач автоматического наведения основан на применении теории игр, а именно игрового динамического подхода. Данный метод позволяет реализовать встречу БПЛА с некоторой подвижной целью за расчетный интервал времени путем формирования требуемого закона управления, в конкретном случае в виде оптимального ускорения.

В игровой динамической задаче предполагается, что преследователь, которым является рассматриваемый БПЛА, действует в условиях конфликта интересов с преследуемым объектом, то есть преследователь старается выработать такой закон управления, который позволит достичь цель за минимальное время, в то время как преследуемый старается этого избежать. Для решения задачи конфликту необходимо придать аналитическую численную форму. В общем случае задача преследования [1] определяется следующим условием (1):

$$J = \min_{a_1} \max_{a_2} T, \qquad (1)$$

где $a_1$ – ускорение БПЛА-преследователя; $a_2$ – ускорение цели; $T$ – время наведения.

Выбрав в качестве критерия оптимальности функционал для задач наведения квадратичного вида, характеризующий относительное положение летательных аппаратов на протяжении всего интервала преследования, были определены управляющие воздействия в виде ускорения для БПЛА (формула 2) и цели (формула 3):

$$a_1(t) = \frac{-c_1(t_f - t)\left\{\begin{array}{c} r_1(t) - r_2(t) + \\ +\left[v_1(t) - v_2(t)\right](t_f - t) \end{array}\right\}}{1/b + (c_1 - c_2)\dfrac{(t_f - t)^3}{3}}; \qquad (2)$$

*Таблица 1*

**Характеристики БПЛА «Орион»**

| | |
|---|---|
| размеры (длина, размах крыльев, высота, м) | 8; 16,3; 3,2 |
| взлетный вес, кг | 1000 |
| радиус применения: 250 км | 250 км |
| продолжительность полета: 24 часа (с нагрузкой 60 кг) | 24 часа (с нагрузкой 60 кг) |
| высота полета: 7500 м | 7500 м |
| крейсерская скорость, км/час | 120 (максимальная: 200 км/ч) |

$$a_2(t) = \frac{c_2}{c_1} a_1(t), \qquad (3)$$

где $t_f$ – момент встречи БПЛА с целью; $b$, $c_1$, $c_2$ – весовые коэффициенты функционала, учитывающие наложенные ограничения на систему; $V_1$, $V_2$ – векторы скорости БПЛА и цели соответственно; $r_1$, $r_2$ – векторы положения БПЛА и цели соответственно.

На основании данных формул, предполагая известными для БПЛА-преследователя сведения о местоположении цели и ее параметрах в каждый текущий момент времени, возможно реализовать точное наведение на цель в условиях конфликта интересов. Современные исследования, например [2], показывают, что данную теоретическую задачу возможно решить и на практике путем интеллектуализации системы, что позволит прогнозировать поведение объекта на основе имеющихся накопленных данных.

## Моделирование процесса наведения

Моделирование системы управления наведением выполнялась в пакете прикладных программ Matlab и графической среде Simulink. Был реализован алгоритм формирования оптимальной траектории наведения БПЛА на подвижную цель с применением игровой динамической задачи и разработана система стабилизации БПЛА-преследователя. Кроме того, полученная модель позволяет задавать различное поведение цели, в том числе задачу ее интеллектуального уклонения, с учетом анализа местоположения и маневренных характеристик преследователя. Подробно данная модель рассматривалась автором ранее в [3].

Для приближения имитационной модели к реальной реализация процесса наведения осуществляется на примере отечественного БПЛА «Орион» [4], разработанного компанией «Кронштадт». Данный БПЛА подходит для выполнения различных задач как военного, так и гражданского назначения, требующих продолжительного дальнего автономного полета и хороших показателей маневренности. Характеристики данного летательного аппарата, с учетом которых реализуется разработка модели процесса наведения на подвижную цель, представлены в табл. 1.

В соответствии с таблицей максимальной высотой полета является высота 7500 м на рис. представлена модель, в соответствии с которой выполняется расчет векторов скорости и положения БПЛА. Блок «Saturation» (выделен красным) позволяет искусственно наложить ограничения на систему по максимально допустимому значению параметра и в случае его превышения выдерживать заданное.

Аналогичным образом реализовано ограничение по допустимым углам атаки и тангажа в системе стабилизации и управления движением БПЛА. За критические значения углов приняты значения ±30 градусов, или ±0,52 рад. Во многих реальных системах в случае усугубления ситуации, когда для удержания заданной вертикальной скорости угол атаки продолжает расти и приближается к своему крити-

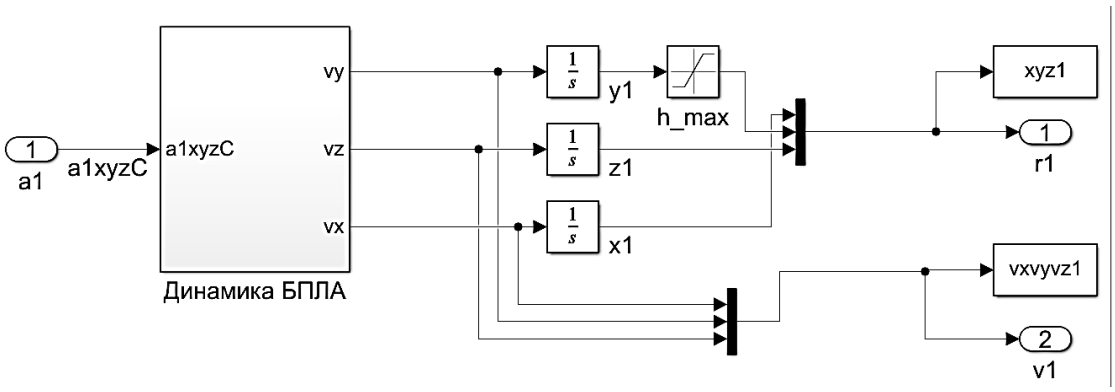



*Рис. 1. Модель определения параметров движения БПЛА*

ческому значению, срабатывает защита по углу атаки, имеющая высший приоритет над удержанием вертикальной скорости для того, чтобы не допустить дальнейшего роста угла атаки и сваливания. В представленной модели угол атаки после достижения своего предельного значения остается постоянным до тех пор, пока не будет изменена траектория движения в связи с изменением относительного положения БПЛА и цели.

Соответственно, ограничение по данным углам так же регулирует величину вертикальной скорости. Максимально допустимые значения для вектора скорости по трем осям выбраны аналогично на основании таблицы – 200 км/ч, или 55 м/с, и корректируются системой при построении оптимальной траектории наведения.

На рис. 2 представлены графики проекций скоростей по осям Y (в вертикальной плоско-

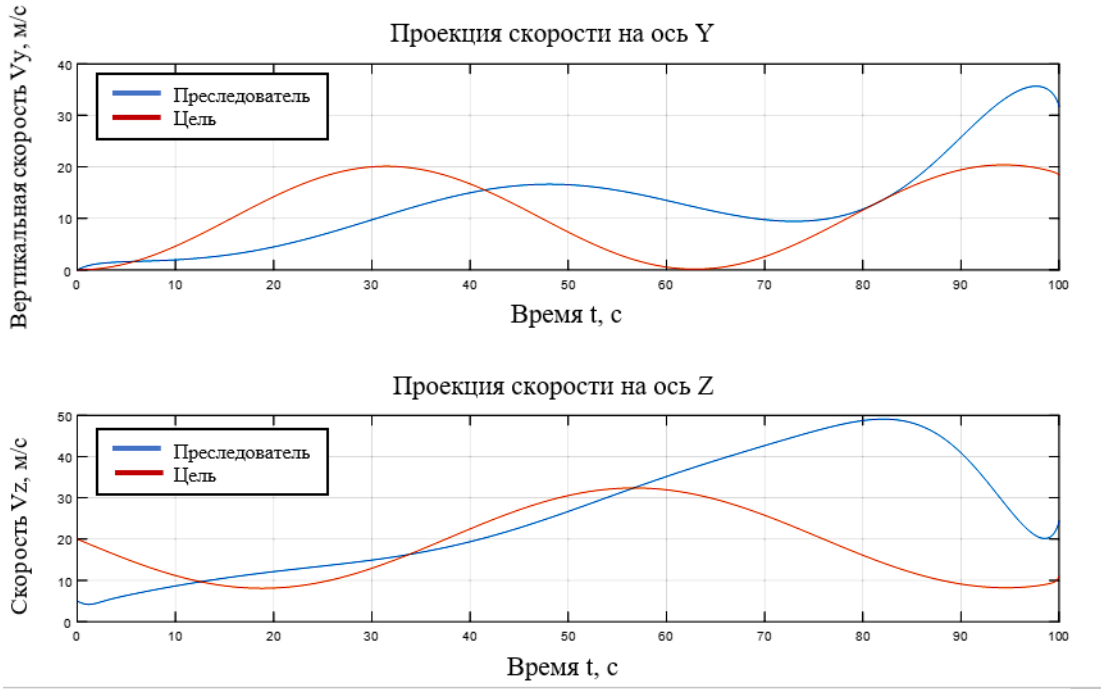



*Рис. 2. Графики проекций скоростей БПЛА и цели*

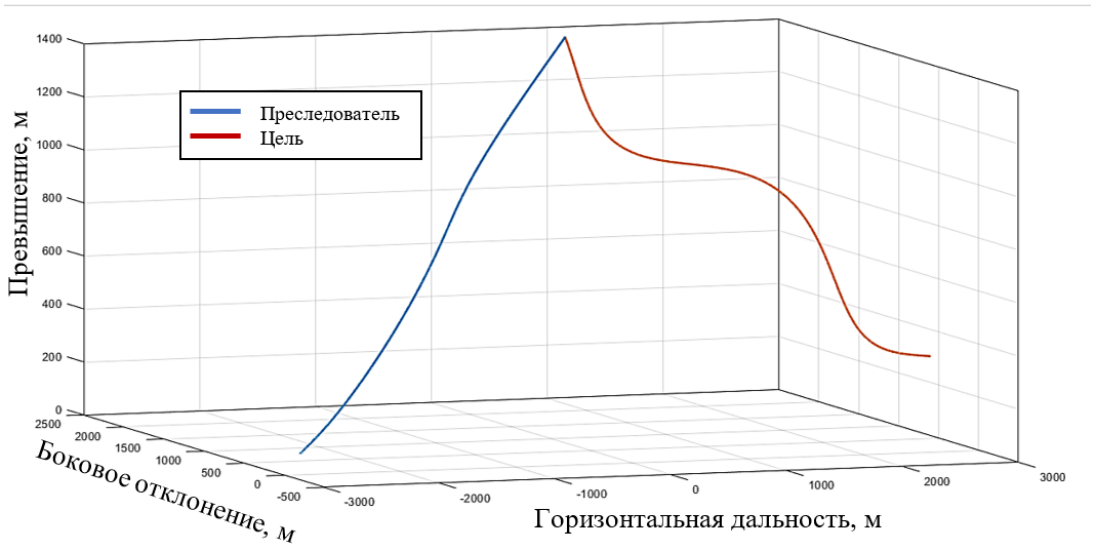



*Рис. 3. Трехмерная модель наведения на цель*

сти) и Z (в горизонтальной). Анализируя графики видно, что в результате моделирования с наложенными ограничениями на предельные значения параметров движения БПЛА, его скорость не превышает максимального значения 55 м/с.

Представленная имитационная модель позволяет спрогнозировать встречу БПЛА и цели, результаты чего в виде трехмерной модели представлены на рис. 3. В конечный момент времени координаты БПЛА и цели совпадают, что означает успешно реализованный процесс наведения с применением игрового динамического подхода.

Накладываемые ограничения на разрабатываемую систему могут несколько уменьшить шансы имитационной модели БПЛА реализовать встречу с высокоманевренной целью, однако приближают процесс наведения к реальному. Для повышения вероятности успешного результата при встрече с целью, обладающей схожими характеристиками, возможно использование нескольких беспилотных летательных аппаратов, объединенных в группу. Представленный в данной статье метод наведения может послужить для этого основой.

**Библиографический список**

1. *Желнин Ю. Н., Шилов Ю. Я.* Нелинейная игровая задача преследования на плоскости // Ученые записки ЦАГИ. 1974. № 5.

2. *Хачумов М. В.* Задача автоматического управления летательным аппаратом в процессе преследования цели. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zadacha-avtomaticheskogo-upravleniya-letatelnym-apparatom-v-protsesse-presledovaniya-tseli/viewer (дата обращения: 07.12.2021).

3. *Сайфуллина А. В., Панферов А. И.* Система управления наведением беспилотного летательного аппарата // 74-я Международ. студ. науч. конф. (19–23 апреля 2021 г.): сб. докл.: в 4 ч. Ч. 1: Технические науки. СПб.: ГУАП, 2021. С. 110–112.

4. Компания «Кронштадт». Беспилотный летательный аппарат «Орион». URL: https://kronshtadt.ru/products/bespilotnyij-kompleks-orion (дата обращения: 06.12.2021).

**УДК 629.78** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-174**

***Я. Г. Цируль****
*аспирант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ В КАЧЕСТВЕ СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

*Приведены возможные способы управления бортового оборудования и особенности эксплуатации космического корабля (КК). При работе бортового оборудования (БО), связанного с системой управления движением, используются методы, называемые типовыми (невидящими) преобразованиями.*
***Ключевые слова:*** *космический корабль, интенсивно движущийся объект, бортовое оборудование, запоминающее устройство, бортовой комплекс управления, система управления бортовым оборудованием.*

***Y. G. Tsirul****
*PhD Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# SPACESHIP AS A COMPLEX TECHNICAL OBJECT WITH A CHANGEABLE CONFIGURATION

*Possible methods of onboard equipment control and features of spacecraft operation are presented. In the operation of on-board equipment associated with a traffic control system, methods are used, called typical (blind) conversions.*
***Keywords:*** *spacecraft, intensively moving object, onboard equipment, storage device, onboard control complex, onboard equipment control system.*

Физический объект, произведенный неестественным образом, имеющий возможность строить взаимосвязь со средой (связь первой степени), с иными объектами данного типа (связь второй степени) и осуществлять передвижение в пространстве, называется интенсивно движущийся объект (ИДО).

Работа ИДО включает в себя четыре основных части:

Преобразование состояния оборудования, включенного в ИДО.

Реформирование взаимосвязи ИДО с иными объектами данного типа, со средой.

Передвижение ИДО в качестве физического объекта в пространстве.

Преобразование состояния бортового резерва.

Обобщенная структурная схема ИДО представлена на рис. 1.

На рис. 2 показана структурная схема руководящих подсистем космического корабля (КК). Используются такие сокращения как: ССН – система спутниковой навигации, БСКВП – бортовой синхронизирующий координатно-временной прибор, СИО – система информационного обмена, БО КИС – бортовое оборудование командно-измерительной системы, БИТС – бортовая информационно-телеметрическая система, ББС – бортовая вычислительная система, БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина, БПО – бортовое программное обеспечение, СУД – система управления движением, БО СУД – бортовое оборудование СУД, СУПС – система управления примыкающих систем. СПКРП – система передачи команд и распределения питания, БПВ – блок приборов взаимодействия, СКВР – система контроля и восстановления работоспособности, СЭП – система электропитания, СОТР – система обеспечения терморегулирования, СДУ – связанная двигательная установка, ЦО – целевое оборудование, БКУ – бортовой комплекс управления, БСК – бортовой специальный комплекс, БОК – бортовой обеспечивающий комплекс, СУНЗ – секция управления на Земле, ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система.

Классификация главных комплексов КК поделена:

За передачу отдельной информации потребителю, функционирование целевого оборудования отвечает БСК.

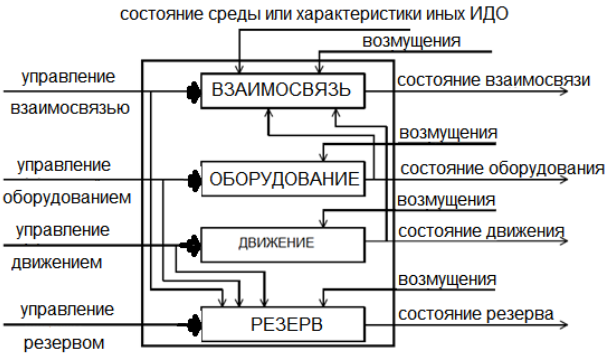



*Рис. 1. Структура ИДО в общем случае*

Функции управления КК реализовывает БКУ в целях произведения нужных для функционирования БСК, условий.

Второстепенные системы, которые содержит БОК, обеспечивают в общем работу КК.

Реализация связи с наружной средой происходит:

При связи с иными КК, при осуществлении связи с материальной средой.

Когда секция управления на Земле (СУНЗ) получает данные о техническом состоянии космического корабля.

При помощи различных запасов, определенных систем в составе КК можно произвести изменение процедуры их управления:

Электронно-энергетический сегмент регулирования.

Регулирование запасов топлива.

Регулирование резервов информации в составе КК.

Разделение различных (возобновляемых и не возобновляемых) резервов среди потребителей содержатся в так называемых совмещенных концепциях и подсистемах в составе КК.

Различные обстоятельства (чрезвычайные, пред-чрезвычайные, непредвиденные, допустимые) входят в состав назначений структуры управления бортовым оборудованием (СУБО).

СУБО отвечает за:

Завершение главных, а также запасных групп БО систем КК, начало работы и преобразование порядков функционирования.

Возобновление (по средствам автоматики или с помощью установок СУНЗ) функционирования.

Автоматическая работа существующих КК осуществляется также с помощью небольшого количества назначений, поэтому к ИДО можно добавить:

Процесс структурного и рабочего изменения БО КА.

До рабочего звена производится проверка БО и установление источников неполадок.

Система управления живучестью (СУЖ) имеет особую значимость в управлении БО КК. СУЖ осуществляет свою работу за счет таких аспектов [3]:

Решение проблем работы, связанных с КК, его бортовой системой (БС) и БКУ, при помощи компонентных проектов и материальных аспектов БО. Таким образом, начинает формироваться СУЖ.

Проработка рабочих вопросов, связанных с СУЖ, при помощи программных блоков специального назначения для реализации внутреннего программного обеспечения (ПО) БС.

Субординационная 3-ступенчатая система, которая осуществляется по средствам программ набором средств бортовых расчетов. Так описывается СУЖ в [2], [3].

Микропроцессоры входят в состав БО и производят анализ материальных аргументов, про-

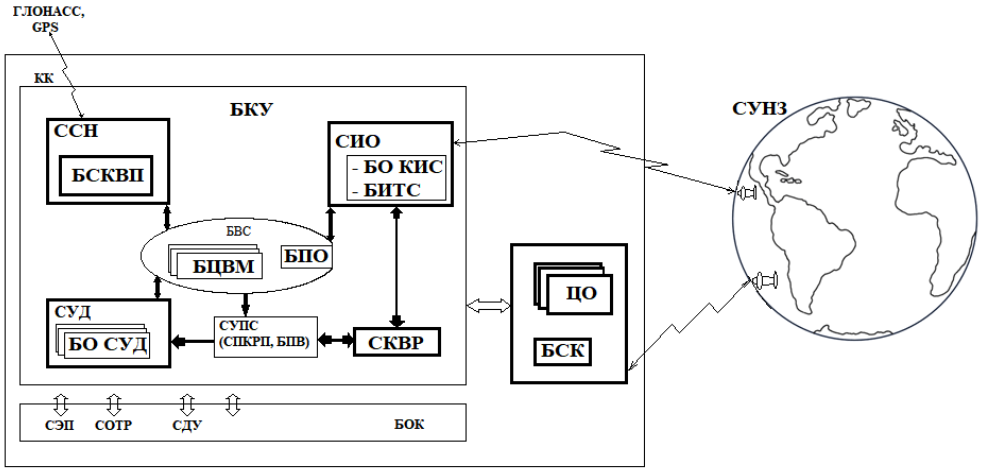



*Рис. 2. Структура руководящих подсистем космического корабля*

*Таблица 1*

**Конструкция и целостное управление СУЖ**

| Ресурсы контролирования и управления | Аспекты осуществления на существующих КК | Необходимый результат |
|---|---|---|
| Анализ функционирования бортового оборудования | Коммуникационный узел в СУНЗ | В чрезвычайных ситуациях проработка устранения ошибок производится автоматически |
| Бортовое оборудование защищено контролем «чрезвычайных» конфигураций | От БО в БВС производится оповещение | При чрезвычайных ситуациях происходит быстрая реакция на борту космического корабля |
| Бортовое оборудование снабжено высоко-вычислительными блоками | БО находится под постоянной диагностикой, для поверки качества функционирования систем | При чрезвычайных ситуациях производится диагностика нерабочих бортовых систем |
| Запас работоспособной аппаратуры | Системная и работоспособная чрезмерность | Все оборудование на борту и все системы космического корабля работают в обычном режиме |

рабатывают вопросы, связанные с работой КК, предоставляют автономное наблюдение этих вопросов – минимальная ступень СУЖ.

В средней ступени для анализа рабочих линий, к которым относятся панели ионизирующих излучений, которые впоследствии вырабатывают электрическую энергию, сохранение температуры и так далее, используется вычислительная машина специализированного назначения.

В случае если происходит чрезвычайная ситуация, тогда на максимальной ступени осуществляется анализ всех систем КК, его проводит основной механизм БВС БКУ за счет функционирования структурного скрипта.

Реконструкция функционирования систем проводится в следующем порядке:

Из системы управления устраняется БО, пришедшее в негодность.

Осуществляется диагностика и проверка на работоспособность неисправной БО.

Далее начинается работа запасной рабочей БО.

Системы КК возвращаются к обычному режиму работы.

Наконец вся система обрабатывается для вывода данных о начале работы.

За состав устройства управления космического корабля ответственны СУЖ, СУБО, СУСП и СПКРП, работающие взаимосвязано друг с другом. Конструкция и целостное управление СУЖ описаны в табл. 1.

В заключение необходимо сказать, что КК также включает в себя комплекс ПО, которое нужно на всех этапах разработки системы управления. Заданное ПО, именуемое бортовым обеспечением (БО) КК, используется в БВС. Основной вычислительный механизм, включает в себя определенное количество запасных блоков и входит в состав БКУ. Также возможен вариант, при котором используются бортовые вычислительные системы [4].

БВС имеет существенную значимость, так как [5]:

– в настоящее время у бортовых электронно-вычислительных машин (ЭВМ) значительно повышена эффективность.

– в космическом производстве все чаще используются микро-технологические инновационные технологии.

– использование высоко-вычислительных модулей.

**Библиографический список**

1. *Калинин В. Н.* Теоретические основы управления активными подвижными объектами. М., 1974. 223 с.

2. *Ахметов Р. Н.* Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева, Самара, СГАУ. 2008. № 2 (15). С. 194–210.

3. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. П. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб. М.: Машиностроение, 2010. 384 с.

4. *Ахметов Р. Н., Макаров В. П., Соллогуб А. В.* Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях // Известия самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 3-1. С. 165–176.

5. *Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

**УДК 681.2-5**

***А. И. Панферов****
*кандидат технических наук, доцент*
***А. Д. Шварок****
*студент*
***Т. П. Познякова****
*студент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СТРУННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ

*Рассмотрены основной принцип работы струнного акселерометра и перспективы развития акселерометров на основе волоконной вибрирующей проволоки. Рассмотрены основные преимущества волоконно-оптических струнных акселерометров на основе волоконной решетки Брегга (ВБР).*
***Ключевые слова:*** *акселерометр, инерциальные системы управления, автоколебания, инерционная масса волоконная решетка Брегга (ВБР).*

***A. I. Panferov****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***A. D. Shvarok****
*Student*
***T. P. Poznyakova****
*Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# STRING ACCELEROMETERS BASED ON FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES AND PROSPECTS FOR THEIR DEVELOPMENT

*The basic principle of operation of the string accelerometer and the prospects for the development of accelerometers based on fiber vibrating wire are considered. The main advantages of fiber-optic string accelerometers based on a fiber Bragg grid (BFG) are considered.*
***Keywords:*** *accelerometer, inertial control systems, self-oscillations, inertial mass, Bragg fiber grid (BFG).*

## Введение

В данной статье рассматривается строение струнного акселерометра и приводится описание струнного акселерометра с волоконной решеткой Брегга.

Струнные акселерометры применяются в инерциальных системах управления [1]. При диапазоне измерения ускорений до 20g их погрешность не превышает ±0,004 %.

В акселерометрах со струнными преобразователями смещение массы меняет упругие свойства струн, натянутых в направлении оси чувствительности. Упругий подвес исключает движение массы в поперечном направлении. Сумма частот колебаний струн поддерживается постоянной посредством регулирующего устройства, с помощью знакопеременного тока и магнитного поля. Струна подвергается воздействию силы Ампера, постоянно меняющей свое направление, благодаря чему частота колебаний струны неизменна.

Струнные акселерометры имеют высокою надежность и точность выходного сигнала, кроме того, обладают простой конструкцией.

Несмотря на то, что струнные акселерометры были изобретены в середине XX века, данный тип акселерометров и сейчас является актуальным, если отдавать преимущество точности, а не габаритам.

К современным струнным акселерометрам можно отнести вибрационно-частотные струнные акселерометры на основе автоколебаний волоконной вибрирующей проволоки [2].

## Волоконно-оптические струнные акселерометры

*Акселерометр с волоконно-оптическим измерительным преобразователем* основан на эффекте фотоупругости. Некоторые материалы (эпоксидная смола, нитрат лития и др.) меняют свои оптические свойства при их деформировании. На этой основе создан целый ряд средств измерения, в которых сила преобразуется в деформацию [3]. Вещество считается обладающим фотоупругими свойствами, если его показатель преломления можно изменить некоторым приложенным механическим напряжением или деформацией [4].

На рис. 1 источник света 1 (например, полупроводниковый лазер), проходя через линзу 3 и поляризатор 4, поступает на стержень из фотоупругого материала 5, изменяющий свое напряженное состояние в зависимости от ускорения груза акселерометра 2. Преобразуя полученный сигнал с помощью четвертьволновой пластины 6, анализатора 7 и линзы 8, он поступает по волоконному светопроводу 9 на приемник излучения (фотодиод) 10. В результате определяется величина ускорения с достаточно высокой точностью. Так, при массе груза 25 г чувствительность рассмотренного акселерометра составляет 0,01g.

В данной статье рассматривается одно из таких устройств – струнные акселерометр на основе волоконной решетки Брегга.

Преимущества волоконной решетки Брегга заключаются в устойчивости к электромагнитным помехам, высокой термоустойчивости, коррозионной стойкости и хорошей пропускной способностью сигнала, благодаря чему акселерометры на основе ВБР добились огромного прогресса [5]. Как правило, преобразование ускорения, приложенного к датчику, в деформацию осуществляется подвесом, к которому присоединяется датчик ВБР. Ускорение вызывает деформацию подвеса, и ВБР будет деформироваться вместе с подвесом из-за вибрации инерционной массы (ИМ). Средняя длина волны отраженного света будет смещаться с изменением напряжения, действующего на ВБР. Чтобы исключить внешние механические и тепловые воздействия на ИМ был установлен микросейсмический датчик с одной степенью свободы на основе волоконной вибрирующей проволоки. Он генерирует сигнал пропорциональный внешним возмущениям [6]. Ускорение, регистрируемое датчиком, должно быть преобразовано в механическую нагрузку, оказываемую на ВБР. Из полученного при этом сдвига длины волны отражения ВБР с помощью устройств обработки сигнала вычисляется ускорение. Процесс обнаружения внешних и тепловых возмущений осуществляется без помощи консольной балочной конструкции. Из-за этого были увеличены чувствительность и диапазон частотной характеристики. Горизонтальное волокно было добавлено к акселерометру, чтобы уменьшить перекрестную чувствительность (уменьшение перекрестных колебаний).

Чувствительная функция ВБР определяется зависимостью как показателя преломления, так и периода решетки от внешних механических или тепловых возмущений. Поле деформации влияет на отклик ВБР напрямую, через расширение и сжатие размера шага решетки и через оптический эффект деформации, то есть вызванную деформацией модификацию показателя преломления. Акселерометр с ВБР может быть упрощен до системы с пружинной массой [6]. На рис. 2 представлен чувствительный элемент струнного акселерометра с воло-

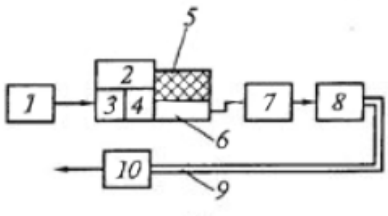



*Рис. 1. Акселерометр с волоконно-оптическим преобразователем*

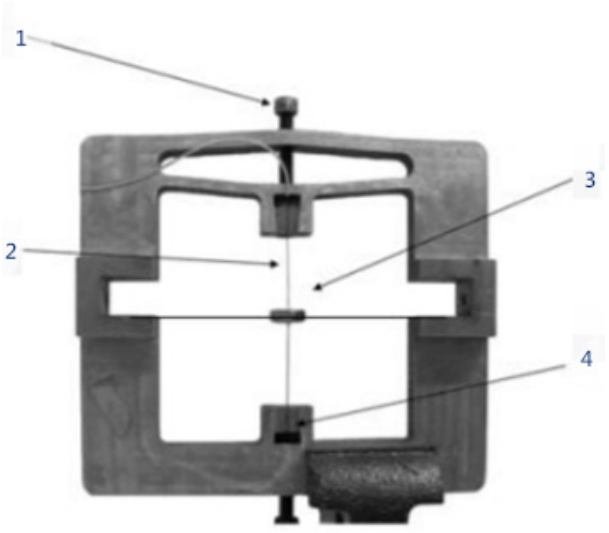



*Рис. 2. Чувствительный элемент струнного акселерометра с ВБР*

конной решеткой Брегга, где 1 – винт регулировки; 2 – ВБР; 3 – ИМ; 4 – трапециевидная рама.

## Вывод

Таким образом, отказавшись от консольной балки, габариты струнного акселерометра стали значительно меньше. В то же время благодаря ВБР можно получить очень высокую чувствительность 108 пм/мс$^{-2}$ при частоте 100 Гц, которая будет возрастать с увеличением частоты [6]. Наблюдается линейная зависимость между амплитудой обнаруженного сигнала и ускорением. Регулируя качество генератора колебаний, собственную частоту автоколебаний можно установить в разумном диапазоне. Горизонтальное волокно, добавленное к акселерометру, может эффективно снизить перекрестную чувствительность. Кроме того, соответствующая волоконно-вибрирующая проволока может устранить влияние температуры. Таким образом, перспективы развития струнного акселерометра заключаются в уменьшении габаритов и сохранении точностных характеристик прибора.

В отличие от традиционных акселерометров с пьезоэлектрическим или емкостным датчиком, ВБР может измерять малейшие изменения ускорений объекта, в том числе сейсмические колебания земной поверхности, но при этом диапазон измерений всего лишь до 5g. Поэтому одной из основных сфер применения волоконно-оптических акселерометров является сфера геофизических исследований, рассматривающая мониторинг сейсмических сигналов, находящихся в частотном спектре от 0,0001 до 100 Гц, установка на беспилотное оборудование для геофизических исследований в труднодоступных для человека местах [6].

### Библиографический список

1. *Матвеев В. В.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие / Государственный научный центр Российской Федерации – Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». СПб., 2009. 278 с.

2. *Шкалов С. Ю., Кичкидов А. А.* Вибрационно-частотные струнные преобразователи в автономных управляющих системах // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2013. № 3 (7). С. 203–206.

3. Методы и средства измерения ускорений. URL: https://www.metalcutting.ru/content/metody-i-sredstva-izmereniya-uskoreniy (дата обращения: 01.12.2021).

4. *Удда Э.* Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.

5. *Venghaus H.* Wavelength Filters in Fibre Optics: Springer Series in Optical Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 456 p.

6. *Jiang Q.* A Novel Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Fiber Vibrating Wire // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. Vol. 7. Issue 5. P. 1–5.

**УДК 623.746.519** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-180**

***И. Е. Лезова****
*ассистент*
***А. А. Лезов****
*кандидат физико-математических наук, доцент*
***А. А. Лезова*****
*кандидат физико-математических наук, доцент*
***В. Б. Рогожин*****
*кандидат физико-математических наук, старший преподаватель*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный университет*

# РАЗРАБОТКА МЕЗОМАСШТАБНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

*В работе представлена оценка возможности проектирования микролетательных аппаратов (MAV, Micro air vehicle). Рассмотрено создание циклокоптеров, которое отвечают условиям по габаритам и массе, предъявляемым к MAV. Представлен расчет схемы циклокоптера, на основании экспериментальных данных о зависимости коэффициента лобового сопротивления и коэффициента подъемной силы. Произведено сравнение параметров с имеющейся оптимизированной схемой циклокоптера, спроектированной на базе традиционных способов создания подъемной силы.*
***Ключевые слова:*** *микролетательные аппараты, циклокоптер, аэродинамический коэффициент.*

***I. E. Lezova****
*Assistant*
***A. A. Lezov****
*PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor*
***A. A. Lezova*****
*PhD Sc. Phys.-Math., Associate Professor*
***V. B. Rogozhin*****
*PhD Sc. Phys.-Math., Senior Lecturer*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State University*

# DEVELOMENT OF A MESOSCALE UNMANNED AERIAL VEHICLE USING DRAG

*The paper presents an assessment of the possibility of designing micro-flying vehicles (MAV, Micro air vehicle). The creation of cyclocopters, which meets the conditions in terms of dimensions and weight, imposed on the MAV is considered. The calculation of the cyclocopter scheme is presented, based on the experimental data on the dependence of the drag coefficient and the lift coefficient. Comparison of the parameters with the existing optimized cyclocopter scheme, designed on the basis of traditional methods of creating lift.*
***Keywords:*** *micro-flying vehicles, cyclocopter, aerodynamic coefficient.*

В настоящее время как в России, так за рубежом ведутся разработки различных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Стремительно в последние годы развивается область микровоздушных или микролетательных аппаратов (MAV, Micro air vehicle) с максимальным размером 15 см и максимальным весом 100 г [1]. Данные устройства могут применяться для воздушного мониторинга линий электропередач, координации поисково-спасательных операций, экологического мониторинга, геодезии и картографии, городского хозяйства, в транспортных целях. Одним из наиболее перспективных направлений создания подобных устройств является циклокоптер, в котором для создания подъемной силы и силы тяги используются вращающиеся роторы (циклороторы), состоящие из поворотных лопастей с обычным авиационным профилем.

Для разнообразных применений требуется платформа MAV с высокой выносливостью, маневренностью, устойчивостью к порывам ветра, возможностью зависания и высокоскоростного полета. Как особый класс летательных ап-

паратов, подобные беспилотные летательные аппараты сталкиваются с множеством уникальных проблем, которые затрудняют их проектирование и разработку, в частности, MAV работают в очень чувствительном режиме чисел Рейнольдса [2]. Несмотря на успех в больших масштабах, обычные конфигурации компоновки винтов существенно ухудшили свои характеристики при низких числах Рейнольдса (10 000–50 000), при которых предполагается работа MAV. И создание аппаратов, способных эффективно летать в этом режиме полета, стало представлять собой совершенно новую задачу для инженеров-конструкторов БПЛА [3], [4].

Одно из направлений решения этой задачи – создание микровоздушных летательных аппаратов, имитирующих технику полета птиц или насекомых [3], [5]–[8]. Другой возможностью стало создание циклокоптеров, отвечающих требованиям по габаритам и массе, предъявляемым к MAV [2]–[9]. Так, авторами работы [2] была выполнена оптимизация конструкции с циклоидным ротором.

Следует отметить, что за редким исключением [10] практически во всех литературных источниках рассматриваются конструкции циклолетов, в которых возможность полета обусловливалась исключительно аэродинамическим коэффициентом подъемной силы $C_Y$ (рис. 1). Тем не менее в ряде практических приложений, в частности, для создания MAV могут оказаться перспективными способы создания подъемной силы, обусловленной дополнительно коэффициентом неиндуктивного лобового сопротивления $C_X$. Можно рассмотреть, по крайней мере, два направления проектирования подобных аппаратов. В первом реализуется случай, когда все лопасти цикоротора всегда сохраняют горизонтальное положение по мере его вращения, а подъемная сила создается за счет особой формы лопасти, имеющей существенно разный коэффициент лобового сопротивления при ее движении в противоположных (вверх и вниз) направлениях [10]. Во втором лопасть горизонтальна только при движении ее оси по окружности вниз, а на стадии движения вверх она или стремится занять максимально вертикальное положение для минимизации сопротивления воздуха, или сама принимает форму, минимизирующую это сопротивление.

В настоящей работе приведены расчеты, позволяющие оценить перспективность второго подхода при максимально компактной компоновке роторов в схеме БПЛА.

## Теоретический расчет

Для проведения теоретического расчета была использована идеализированная схема, изображенная на рис. 2. В течение половины периода вращения циклоротора (движение оси лопасти $Q$ по окружности от точки $A$ до точки $B$) лопасть занимает горизонтальное положение, а при движении от точки $B$ к $A$ в процессе вращения вокруг оси циклоротора $O$ лопасть поворачивается на 180°, занимая в любой момент времени тангенциальное положение. Подъемная сила создается на первом полупериоде вращения циклоротора, на втором должна наблюдаться значительно меньшая по величине ввиду положения лопасти противоположная по направлению сила.

Ввиду того что при каждом последующем обороте ротора левый и правый край лопасти меняются местами, целесообразно применять лопасти, симметричные относительно оси $Q$.

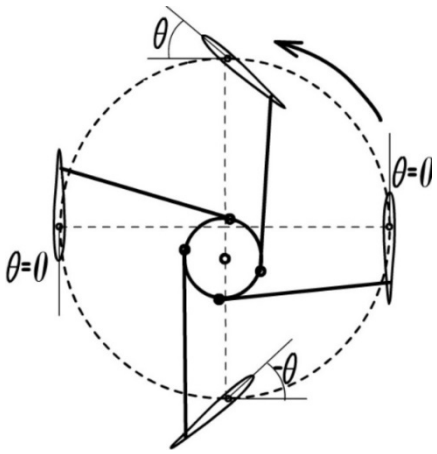



*Рис. 1. Стандартная схема работы циклоротора*

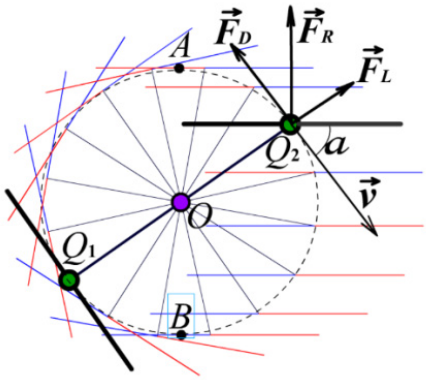



*Рис. 2. Схема работы циклоротора*

Нами был рассмотрен самый простой вариант – плоскую пластину с отношением длины к ширине равным 2,5. Число лопастей было взято равным четырем, при этом максимально допустимая ширина лопасти с позиции неперекрываия лопастей в процессе работы была равна удвоенному радиусу вращения $r$ оси Q относительно центральной оси $O$. Максимально компактная компоновка двух роторов при этом, вытекающая из условия неперекрывания лопастей в процессе работы, показана на рис. 3. Из геометрии устройства следует, что расстояние между центральными осями циклороторов не может оказаться меньше величины $a = 2\sqrt{2}r$.

Несмотря на то, что на стадии движения от точки А до точки В лопасти совершают поступательное движение, положение плоскости лопасти меняется относительно направления скорости вращения $v$ – варьируется угол атаки α. А значит, происходит изменение аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления $C_D$ и подъемной силы $C_L$, определяющих суммарную силу сопротивления $F_R$, направленную вертикально вверх:

$$F_R = F_D \sin\alpha + F_L \cos\alpha, \qquad (1)$$

где $F_D = C_D \frac{\rho v^2}{2} S$, $F_L = C_L \frac{\rho v^2}{2} S$; ρ – плотность воздуха; $S$ – площадь лопасти.

Можно записать, что

$$F_R = C_R \frac{\rho v^2}{2} S \qquad (2)$$

Определение коэффициентов $C_D$ и $C_L$ при различных углах атаки – довольно сложная задача, которая для различных профилей крыла чаще всего решается экспериментально. Для дальнейших расчетов нами были использованы данные работ [11]–[13] для устанавливаемой под различными углами атаки прямоугольной пластины с соотношением между длиной и шириной 2,5. На рис. 4 отображена зависимость указанных коэффициентов от угла атаки α, а также рассчитанного нами в соответствии с (1) коэффициента $C_R$ в диапазоне от 0 до 90°. В диапазоне углов от 90 до 180° значения $C_R$ повторяют в обратном порядке указанные значения от 0 до 90°.

Ввиду геометрии конструкции в каждый момент времени в каждом циклороторе подъемную силу создают две лопасти, смещенные друг относительно друга на 45°. Рассчитанная с учетом указанных значений средняя подъемная сила для одного циклоротора с лопастями площадью 67 см$^2$ и со скоростью вращения 12 м/с составила 1,15 Н. Для двух циклороторов подъемная сила составляет 2,3 Н, что эквивалентно суммарной нагрузке в 230 г. Параметры, использованные при расчете (суммарная площадь установки и линейная скорость вращения ротора) полностью соответствуют оптимизированной установке, представленной в работе [3], где заявленная нагрузка составляла только 60 г.

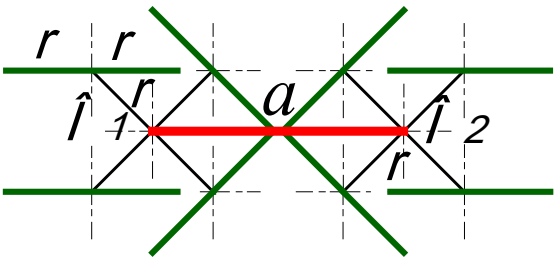



*Рис. 3. Схема максимально компактного расположения циклороторов*

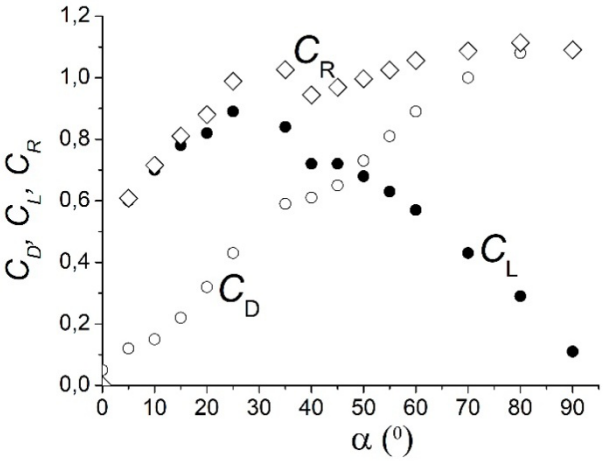



*Рис. 4. Зависимости коэффициентов лобового сопротивления $C_D$, подъемной силы $C_L$ и результирующей силы $C_R$*

## Обсуждение

Выполненный расчет продемонстрировал перспективность создания летательных аппаратов, совмещающих два подхода в создании подъемной силы – за счет использования лобового сопротивления и задействования вклада от реализуемой в стандартных схемах составляющей подъемной силы, действующей на крыло. Подобный подход представляет интерес в первую очередь для создания микровоздушных летательных аппаратов, работающих в режимах, отвечающих малым числам Рейнольдса. Снижение эф-

фективности летательных аппаратов, выполняемых по стандартным схемам, в этих режимах выражается в существенном росте лобового сопротивления при одновременном снижении коэффициента подъемной силы, наблюдаемых для ряда наиболее часто используемых профилей крыла [14]–[16], в то время как в рассмотренной схеме сила лобового сопротивления вносит положительный вклад в результирующую подъемную силу. Использование иных профилей, нежели плоская пластина, способствующих увеличению как коэффициента лобового сопротивления, так и подъемной силы, способно еще более увеличить эффективность конструкции по параметрам подъемной силы, компактности и энергетических затрат. Тем не менее надо понимать, что выполненный расчет можно рассматривать исключительно как предварительный, так как он выполнен на основе данных для стационарно размещенных в воздушном потоке элементов и не подтвержден реальными испытаниями действующей конструкции, которые могут вскрыть дополнительные сложности в создании подобных летательных аппаратов. Кроме того, схема, отраженная на рис. 3, является во многом идеализированной и труднореализуемой в указанном виде. За счет простых способов организации передачи от ведомого вала к ведущему для задания требуемого характера движения лопастей (к примеру, с использованием ременной или цепной передачи) его реализовать затруднительно: движение ведомого вала с лопастью вниз отвечает передаточному отношению, равному единице. А на стадии движения этого же вала вверх передаточное отношение стремится к бесконечности. Впрочем, последняя трудность преодолевается использованием ведущего и ведомого вала со сложной формой сечения (как пример – эллипсовидных сечений), что позволяет в значительной мере приблизиться к рассматриваемому типу движения за счет создания переменного передаточного отношения. Кроме того, не исключаются более сложные схемы управления каждой лопастью в отдельности, позволяющие реализовать не только рассмотренную схему движения, но даже более совершенные варианты.

В целом же, по результатам настоящего исследования можно прогнозировать создание в будущем маневренных летательных аппаратов на базе описанных принципов.

## Заключение

На базе экспериментальных данных о зависимости коэффициент лобового сопротивления и коэффициента подъемной силы для лопастей простой геометрии выполнен расчет схемы циклокоптера, совмещающей разные способы создания результирующей подъемной силы. Произведено сравнение параметров с имеющейся оптимизированной схемой циклокоптера, спроектированной на базе традиционных способов создания подъемной силы. Сделан вывод о перспективности подобного направления в проектировании MAV и о возможных дальнейших путях оптимизации рассматриваемой конструкции.

## Библиографический список

1. *McMichael J.* Francis CMS. Micro air vehicles: toward a new dimension in flight. U.S Department of Defense Weaponse Systems Technology Information Analysis Center (WSTIAC) Newsletter. Vol. 1. N 1–3, Jan–Jul 20.

2. *Shrestha E., Yeo D., Benedict M.* Development of a meso-scale cycloidal-rotor aircraft for micro air vehicle application. International Journal of Micro Air Vehicles, 9 (3). P. 218–231.

3. *Pines D., Bohorquez F.* Challenges Facing Future Micro-Air-Vehicle Development. Journal of Aircraft, 43(2). P. 290–305.

4. *Leishman J.* Principles of helicopter aerodynamics. New York: Cambridge University Press, 2000.

5. *Wu J., Qiu J., Zhang Y.* Automated Kinematics Measurement and Aerodynamics of a Bioinspired Flapping Rotary Wing. Journal of Bionic Engineering, 14 (4). P. 726–737.

6. *Nakata T., Liu H., Tanaka Y.* Aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping-wing micro air vehicle. Bioinspiration Biomimetics, 6 (4), P. 045002.

7. *Ma K., Chirarattananon P., Fuller S.* Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot. Science, 340 (6132). P. 603–607.

8. *Widhiarini S., Park J., Yoon B.* Bird-mimetic Wing System of Flapping-wing Micro Air Vehicle with Autonomous Flight Control Capability. Journal of Bionic Engineering, 13 (3). P. 458–467.

9. *Benedict M., Ramasamy M., Chopra I.* Performance of a Cycloidal Rotor Concept for Micro Air Vehicle Applications. Journal of the American Helicopter Society, 55 (2). P. 22002–2200214.

10. Исследование возможности создания циклокоптера на принципе разности лобовых сопротивлений движителя / В. А. Порватов, А. А. Захарчев, Я. А. Акимов, И. П. Иванов // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 18-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2015. С. 19–21.

11. *Ortiz X., Rival D., Wood D.* Forces and Moments on Flat Plates of Small Aspect Ratio with Application to PV Wind Loads and Small Wind Turbine Blades. Energies, 8 (4). P. 2438–2453.

12. *Shademan M., Barron R., Balachandar R.* Numerical simulation of wind loading on ground-mounted solar panels at different flow configurations. Canadian Journal of Civil Engineering, 41 (8). P. 728–738.

13. *You J., Lim M., You K.* Wind Coefficient Distribution of Arranged Ground Photovoltaic Panels. Sustainability, 13 (7). P. 3944.

14. *Jain S., Sitaram N., Krishnaswamy S.* Effect of Reynolds Number on Aerodynamics of Airfoil with Gurney Flap. International Journal of Rotating Machinery, 2015. P. 1–10.

15. *Winslow J., Otsuka H., Govindarajan B.* Basic Understanding of Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers (104–105) // Journal of Aircraft, 55 (3). P. 1050–1061.

16. *Wang S., Zhou Y., Alam M.* Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. Physics of Fluids, 26 (11). P. 115107.

**УДК 629.039.58; 614.875**

***А. П. Григорьев****
*старший преподаватель*
***С. Г. Бурлуцкий****
*кандидат технических наук, доцент*
***Р. В. Штындик*****
*инженер 1 категории*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***АО «КБ «Арсенал» им. М. В. Фрунзе»*

# РАЗРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА НАВИГАЦИИ И ВРЕМЕНИ

*В рамках данной статьи авторами рассматривается проектирование радиационно-стойкого троированного контроллера навигации и времени с применением метода снятия питания по показаниям детекторов радиационной обстановки. Приведен состав контроллера и описан принцип его работы. Предложен алгоритм для борьбы с радиационно-индуцированными токами утечки и сдвигом порогового напряжения транзисторов.*
***Ключевые слова:*** *космический аппарат, бортовая аппаратура, контроллер навигации и времени троированный, детектор радиационной обстановки, алгоритм парирования тиристорного эффекта.*

***A. P. Grigoriev****
*Senior Lecturer*
***S. G. Burlutskiy****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***R. V. Shtyndik*****
*Engineer of 1 category*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

***JSC «M. V. Frunze Arsenal Design Bureau»*

# DEVELOPMENT OF SPACE TRIPLED NAVIGATION AND TIME CONTROLLER

*Within the framework of this article, the authors consider the design of a radiation-resistant controller for navigation and time tripled using the method of removing power according to the indications of radiation detectors. The composition of the controller is given and also described the principle of its operation. Proposed an algorithm for dealing with radiation-induced leakage currents and a shift in the threshold voltage of transistors.*
***Keywords:*** *spacecraft, onboard equipment, tripled navigation and time controller, radiation condition detector, thyristor effect parrying algorithm.*

В рамках данной статьи авторами рассматривается проектирование радиационно-стойкого [1] контроллера навигации и времени, троированного (КНВТ) на базе разработанного ООО «Нилакт ДОСААФ» (г. Калуга) авиационного КНВТ. Основными и естественными недостатками последнего являются неудовлетворяющая космической [2], [3] модели внешних воздействующих факторов (ВВФ) радиационная стойкость электронной компонентной базы (ЭКБ) [3] из состава КНВТ. Основными задачами модернизируемого КНВТ являются обеспечение бортовой аппаратуры (БА) космического аппарата (КА) точным стабильным временем и навигационными параметрами (координаты собственного местоположения в пространстве, скорость).

Рассматриваемый КНВТ содержит аппаратуру спутниковой навигации, высокостабильный генератор, контроллер обработки навигации и времени. Погрешность определения на орбите не превышает 15 м по координатам и 1,5 см/сек. по скорости.

Телеметрическая информация КНВТ планируется к использованию на борту КА для синхронизации работы всей БА и/или решения различных навигационных задач, а также будет транслироваться на наземный комплекс управления (НКУ) для планирования сеансов связи с КА и формирования полетных заданий.

Форматы и параметры бортовой шкалы времени (БШВ) определяются требованиями КА и протоколом информационного взаимодействия БА в рамках применяемого бортового интер-

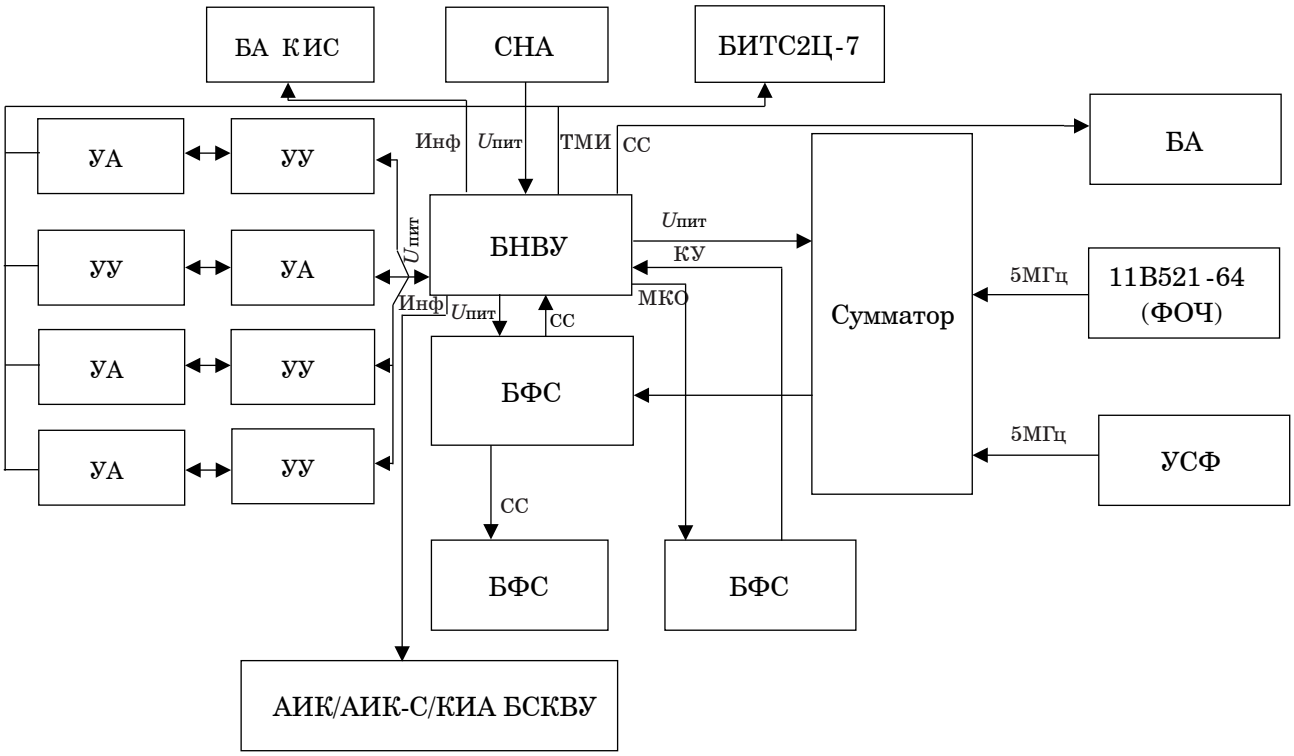



*Рис. 1. Структурная схема КНВТ космического назначения: БФС – блок формирования синхросигналов; БВС – бортовая вычислительная система; БА – бортовая аппаратура; СС – синхросигнал; УА – устройство антенное; УУ – устройство усилительное; БНВУ – бортовое навигационно-временное устройство; СНА – стабилизатор напряжения и автоматики; ФОЧ – прибор формирования опорной частоты; УСФ – устройство синхронизации и формирования сигнала*

фейса (МКО, CANBUS, SpaceWire и пр.). Синхронизация БШВ производится по всемирному времени спутниковых навигационных систем или по наземному времени, разрешение при этом 1 мкс. Средствами КНВТ обеспечиваются также функции сверки, коррекции и фазирования времени (при наличии соответствующих наземных средств). КНВТ имеет электронную защиту от электростатических разрядов (ЭСР), предусмотрено перепрограммирование отдельных программных модулей в полете. Массогабаритные характеристики КНВТ в моноблочном исполнении: 246 × 140 × 20 мм, 0,65 кг и 246 × 150 × 20 мм, 0,75 кг при исполнении с трехкратным ненагруженным («холодным») резервированием.

На рис. 1 представлена структурная схема КНВТ космического назначения.

Принцип работы КНВТ основан на использовании принципа беззапросных дальномерных измерений между навигационными спутниками и приемником. Координаты спутника входят в состав навигационного сигнала и передаются потребителю. Следует отметить, что КНВТ является приемником только глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС).

Чтобы определить местоположение потребителя, одновременно производятся измерения дальностей до трех навигационных спутников. Метод измерения дальностей основан на вычислении временных задержек принимаемого сигнала от спутника по сравнению с сигналом, генерируемым аппаратурой потребителя. Потребитель, принимая сигнал, засекает время приема и отнимает от него полученное отдельно время подачи сигнала. Полученный отрезок времени является временем прохождения сигнала от спутника до потребителя. Умножив полученное значение на скорость света, получим искомое расстояние до спутника. Для определения местоположения теоретически необходимы 3 спутника, но на практике, иногда, чтобы правильно измерить расстояние, необходим четвертый спутник [3]. На рис. 2 изображено схематическое определение местоположения потребителя, имеющего координаты *x, y, z*. Разноцветные линии – окружности, в центре которых находятся спутники. Они соответствуют истинным дальностям, то есть истинным расстояниям между спутниками и потребителем. Разноцветные тусклые линии – окружности, радиус которых соответствует измеренным

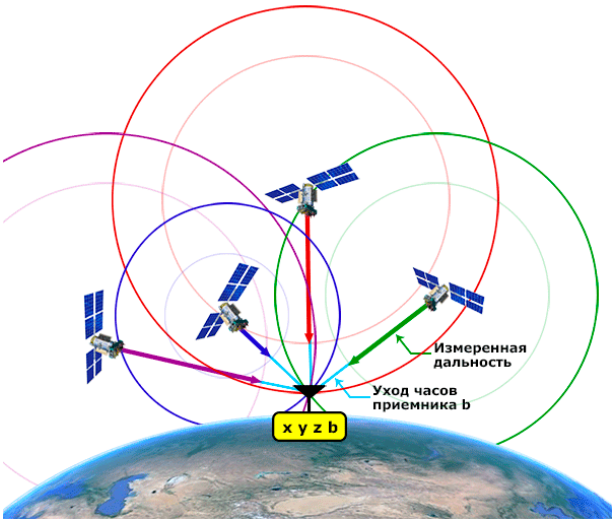



*Рис. 2. Определение местоположения потребителя*

дальностям. Эти дальности отличны от истинных и носят название псевдодальность. Истинная дальность отличается от псевдодальности на определенную величину. Она равна произведению скорости света на время (уход часов b). Это величина смещения часов потребителя относительно системного значения времени. На рис. 2 также представлена ситуация, когда уход часов потребителя больше нуля, то есть часы потребителя обгоняют системное время, поэтому измеренные псевдодальности меньше истинных дальностей [3].

Спутники в системе постоянно посылают навигационные данные двух типов:

– навигационный сигнал стандартной точности (СТ). Сигналы излучаются в диапазоне L1 на частоте 1,6 ГГц;

– навигационный сигнал высокой точности (ВТ). Сигналы излучаются в диапазоне L1и L2 на частоте 1,2 ГГц.

– Информация СТ обеспечивает определение:

– горизонтальных координат объекта с вероятностью 99,7 % (это примерно 50–70 м) [4];

– вертикальных координат объекта с вероятностью 99,7 % (это примерно 70 м);

– точного времени с вероятностью 99,7 % (точность 0,7 мкс).

Доступ к СТ сигнала ГЛОНАСС и соответствующей навигации имеют все потребители, у которых есть приемники ГЛОНАСС. Навигационную точность можно значительно улучшить, используя дополнительные методы измерений. Это было сделано в ВТ сигнале. Только пользователи Министерства обороны Российской Федерации сейчас имеют право пользоваться сигналом ВТ.

Помимо всего остального, в принимаемых данных есть информация о расположении прочих спутников. В результате таких измерений и полученных данных осуществляется определение объекта на местности. При помощи системы навигации и приемника, находящегося на объекте, определяются координаты пользователя и скорость движения объекта. Вся информация «привязывается» к высокоточной шкале UTC (Универсального координированного времени). В итоге потребители могут постоянно пользоваться системой ГЛОНАСС.

Одним из высокоэффективных методов борьбы с ионизирующим излучением считается снятие питания с ЭКБ [4]. Для этого воспользуемся возможностями детектирования заряженных частиц детектором измерения радиационной обстановки борта (ДРОБ), устанавливаемом на большинстве современных КА.

Данное устройство предназначено для измерения:

– радиационной обстановки на борту КА и выдачи результатов измерения для оценки радиационного воздействия (естественного и привнесенного) на БА;

– мгновенной дозы гамма-излучения, плотности потока нейтронов и электронов, интенсивности протонного излучения;

– интегральной дозы радиации.

На рис. 3 приведена структурнкая схема ДРОБ.

Для борьбы с ионизирующим излучением (ИИ) [4] рассмотрим возможность применения алгоритма, реализующего снятие питания по показаниям ДРОБ (рис. 4).

Алгоритм содержит 8 переменных – $A$, $B$, $C$, $D$, $X_1$, $X_2$, $X_3$, $X_4$.

Переменной А присваивается значение с ДГИ, В – с ДНИ, С – с ДЗЧ, D – со всех детекторов. Переменные $X_1$, $X_2$, $X_3$, $X_4$ – это порого-

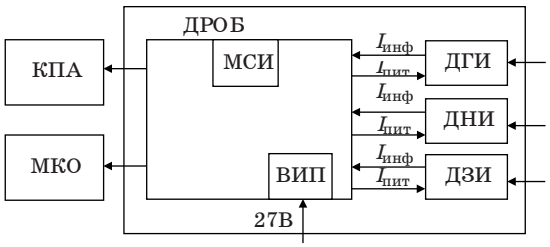



*Рис. 3. Структурная схема ДРОБ: КПА – контрольно-проверочная аппаратура; ВИП – вторичный источник питания; МСИ – модуль сбора информации; ДГИ – детектор гамма-излучения; ДЗЧ – детектор заряженных частиц; ДНИ – детектор нейтронного излучения*

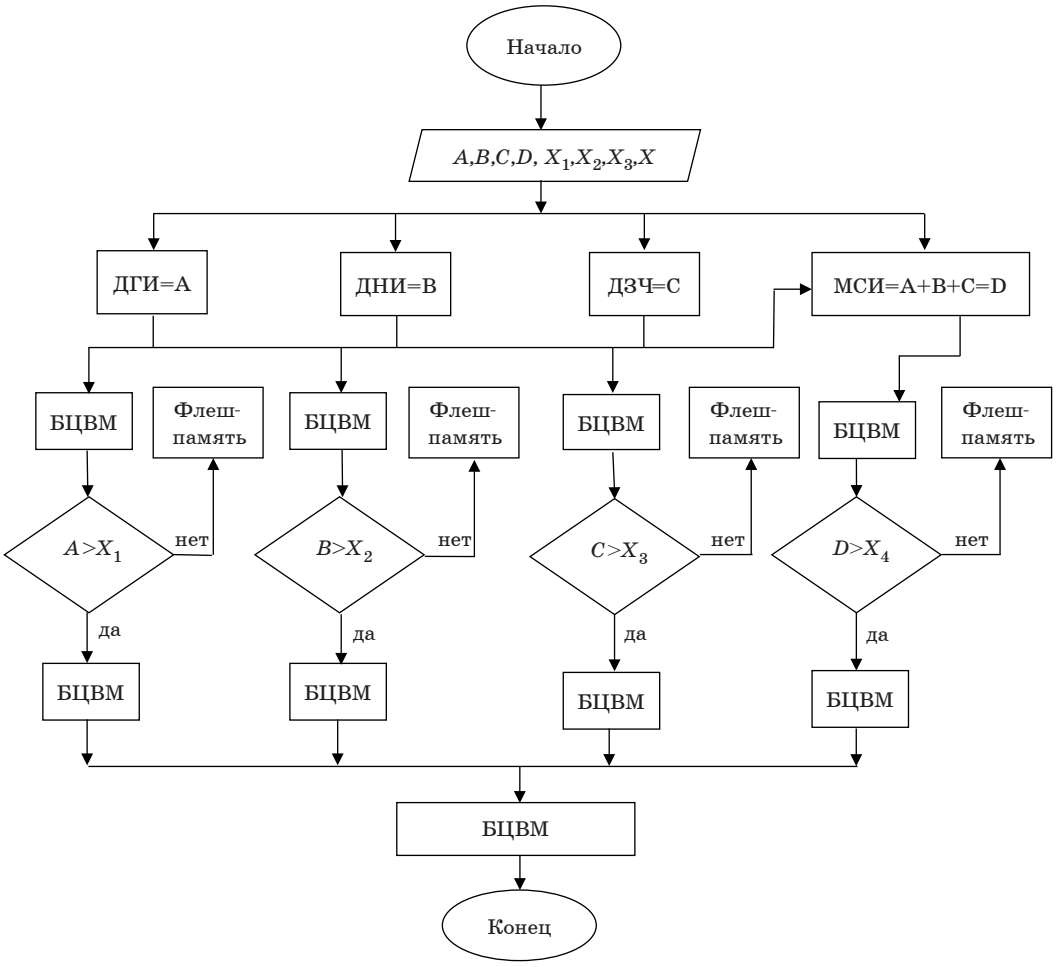



*Рис. 4. Алгоритм, учитывающий снятие питания по показаниям ДРОБ: МСИ – модуль сбора информации; ДГИ – детектор гамма-излучения; ДЗЧ – детектор заряженных частиц; СДНИ – детектор нейтронного излучения; БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина; A, B, C, D – значения поступающих в детектор доз; $X_1$, $X_2$, $X_3$, $X_4$ – предельные значения дозы для каждого вида излучения*

вые значения дозы для каждого вида излучения.

МСИ (D) суммирует значения гамма-излучения, нейтронного излучения и излучения заряженных частиц. Если суммарное значение превышает допустимое, то БЦВМ принимает решение о снятии питания. Если значение не превышает допустимое, то текущая доза записывается во флеш-память, и цикл повторяется.

Аналогично проходит проверка на допустимое значение дозы с детекторов.

В заключение стоит отметить, что требования к радиационной стойкости ЭКБ [4] повышаются по мере развития ракетно-космической техники. В данной статье подробно рассмотрена возможность применения метода снятия питания с КНВТ по показаниям ДРОБ, предложен соответствующий алгоритм для борьбы с радиационно-индуцированными токами утечки и сдвигом порогового напряжения транзисторов.

### Библиографический список

1. *Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.

2. *Акишин А. И., Новиков Л. С.* Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов. М.: Знание, 1983. 64 с.

3. *Кузнецов С. Н., Тверская Л. В.* Радиационные пояса Земли // Модель космоса. М., 2007. Т. 1. С. 518–546.

4. *Мамаев В. Я., Бессонов А. А.* Спутниковые навигационные системы: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2006. 36 с.

**УДК 528.526.6**

***Е. В. Щелкунов****
*аспирант*
***А. А. Макаров****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ

*Статья посвящена обзору отечественных волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и их применение в системах навигации. В статье рассматриваются преимущества ВОГ перед другими типами гироскопов, а также их основные инструментальные погрешности.*
***Ключевые слова:*** *волоконно-оптический гироскоп, точностные характеристики, навигационные системы, транспорт.*

***E. V. Shchelkunov****
*PhD Student*
***A. A. Makarov****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# ANALYSIS OF DOMESTIC FIBER-OPTIC GYROSCOPES AND THEIR PARAMETERS

*The article is devoted to a review of domestic fiber-optic gyroscopes (FOG) and their application in navigation systems. The article discusses the advantages of FOG over other types of gyroscopes, as well as their main instrumental errors.*
***Keywords:*** *fiber-optic gyroscope, accuracy characteristics, navigation systems, transport.*

Одним из самых перспективных направлений признано применение для систем управления и навигации движущимися объектами (авиация, морские суда, наземный транспорт и др.) волоконно-оптического гироскопа (сокращенно ВОГ) – твердотельного датчика с интерферометром Саньяка. Его «твердотельная» конфигурация имеет множество преимуществ по сравнению с другими видами датчиков, использующихся для инерциальной навигации и управления [1].

В настоящее время технологии создания, конструирования и программирования приборов на основе ВОГ постоянно развиваются и самосовершенствуются. Доказательством этого может служить параметр навигационного смещения гироскопа, требования к точности которого за несколько десятилетий сменилось от 01–1 °/час до стратегически необходимых на современных летательных аппаратах и других видах транспорта 0,001 °/час.

Для наглядности обзорного исследования параметров ВОГ приведем сравнительную табл. 1 для семейства высокоточных одноосных измерителей угловой скорости (ОИУС), выпускаемых на НПК (научно-производственная компания) «Оптолинк» [2]. Отличительной чертой этих датчиков является использование замкнутого контура обратной связи, что в свою очередь обеспечивает высокую надежность, минимально низкий уровень шумовых погрешностей, а также высокую точность, достаточную для использования в системах навигации, ориентации и управления на любом виде наземного, морского и авиационного транспорта (в том числе космического) [3]. Положительным фактом данных ОИУС можно выделить потенциально низкую себестоимость в условиях массового производства.

Следующим этапом исследования рассмотрим волоконно-оптические гироскопы компании ООО «Лазерные компоненты». Данные гироскопы предназначены для высокоточного определения пространственной ориентации носителя и могут быть задействованы для фикса-

*Рис. 1. Семейство ОИУС*

*Таблица 1*

**Параметры одноосных ИУС НПК «Оптолинк»**

| Параметры | ОИУС200 | ОИУС501 | ОИУС1000 | ОИУС1001 | ОИУС2000 | ОИУС5000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Диапазон измеряемой угловой скорости, °/сек | ±550 | ±250 (±1000) | ±90 | ±550 | ±30 | ±12 (±550) |
| Дрейф нулевого сигнала при постоянной температуре, °/ч | ≤0,2 | ≤0,03 | ≤0,005 | ≤0,005 | ≤0,003 | ≤0,0015 |
| Погрешность масштабного коэффициента, % | ≤0,03 | ≤0,02 | ≤0,01 | ≤0,01 | ≤0,01 | ≤0,005 |
| Полоса пропускания, Гц (до 2 кГц) | ≥400 | ≥300 | ≥100 | ≥100 | ≥50 | ≥50 |
| Спектральная плотность мощности шума, $°/\sqrt{ч}$ . | ≤0,015 | ≤0,003 | ≤0,0007 | ≤0,0007 | ≤0,0005 | ≤0,00015 |
| Напряжение питания, В | ≤6 | 5±0,25 | | | | |
| Масса, кг | 0.22 | 0.35 | 0.9 | 0.9 | 1.7 | 2.5 |
| Габаритные размеры, мм | ∅70×28 | ∅100×30 | ∅150×45 | ∅150×45 | ∅250×45 | ∅250×45 |
| Диапазон рабочих температур, °С | | | | | | |
| Выходной сигнал | RS – 485, RS – 422 | | | | | |

ции параметров движения, стабилизации платформы в навигационных системах.

Из преимуществ гироскопов данного типа можно выделить технологию цифровой обработки сигнала IntelliProcess, высокое быстродействие с использованием технологии QuickLaunch, оптимальную рабочую длину волны, алгоритм уменьшения случайного блуждания угловой скорости и расширенный динамический диапазон (технология SelfTrack) [4].

*Таблица 2*

**Характеристики одноосных ВОГ компании ООО «Лазерные компоненты»**

| Характеристики | 100А | 200А | 300А |
|---|---|---|---|
| Диапазон измерений, °/сек | от –450 до 450 | | |
| Стабильность смещения, °/ч | ≤1 | 0,5–1 | ≤0.1 |
| Коэффициент случайного блуждания, $°/\sqrt{Гц}$ . | ≤0.1 | | ≤0.01 |
| Нелинейность масштабного коэффициента, млн -1 | ≤300 | | ≤200 |
| Полоса пропускания, Гц | ≥100 | | |
| Рабочее напряжение, В | от -5 до 5 | | |
| Габариты, мм | ∅60×h | | ∅70×h32 |
| Масса, кг | 0.16 | | 0.22 |
| Диапазон рабочих температур, °С | От –40 до 65 | | |
| Интерфейс вывода данных | RS – 422 | | |

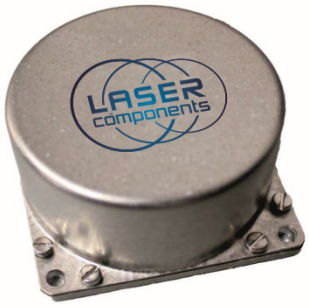



*Рис. 2. Волоконно-оптический гироскоп ЛК-ВОГ-100А/200А/300А*

На примере сравнения параметров ВОГ – 100А и ВОГ – 300А из табл. 2 можно сделать вывод, что при создании новых и модификации предшествующих ВОГ происходит стремитель-

*Рис. 3. ВГ 103, ВГ 1703, ВГ 091А*

ное развитие всей технологии гироскопии. Самые важные параметры новейшей модели превосходят характеристики прошлых минимум в 10 раз, что расширяет возможности использования данного ВОГ во многих отраслях, связанных с навигацией и ориентацией. Однако необходимо отметить, что в целом ОИУС на базе ВОГ, производимые НПК «Оптолинк», значительно выигрывают у гироскопов ВОГ – 100А … ВОГ– 300А по ключевым параметрам, таким как дрейф нулевого сигнала, нелинейность масштабного коэффициента, спектральной мощности шумов и т. д., при практически сопоставимых диапазонах измерения угловой скорости.

Отдельным пунктом выделим целые группы волоконно-оптических гироскопов, создаваемых ЗАО «Физоптика»: ВГ 103, ВГ 1703, ВГ 091А и другие (рис. 3). В большинстве своем данных гироскопы не отличаются сверхвысокой точностью (дрейф от 1 до 3 °/час) и показателями шума (0,04 °/час против 0,0007 °/час у ОИУС1001). Преимуществами данных ВОГ можно считать мировое лидерство по компактности и минимальности энергопотребления, практически неограниченную рабочую полосу частот, а также устойчивость вибрациям, ударам и электромагнитным возмущениям. ЗАО «Физоптика» сочетает исследования, разработку и инновационное конструирование для выпуска ВОГ с высокими эксплуатационными характеристиками по низкой цене. ВОГ работают по принципу прямого преобразования и изготовлены с использованием бесстыковочной технологии волоконно-оптического контура [5]. Выпуск ориентирован на массовое использование в различных сферах электроники и авионики.

Завершающим шагом изучения существующих видов волоконно-оптических гироскопов следует рассмотреть самые сложные в конструировании, настройке и методах улучшения точностных и эксплуатационных параметров – трехосные ВОГ и ИУС. Данные приборы и датчики используются в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС), создающихся на базе ВОГ с разомкнутым и замкнутым контуром. Созданием подобных БИНС занимается компания «Гиролаб». В основном данные БИНС используются в качестве гирокомпаса на беспилотных ЛА, в оборудованиях связи, в сфере медицины и робототехники. Приведем названия некоторых: ГЛ-80, ГЛ-90, ГЛ-100, ГЛ-150 (рис. 4) [6].

В табл. 3 приведены основные параметры трехосных измерителей угловой скорости, разрабатываемых НПК «Оптолинк» прежде всего для космической отрасли, использования на борту гражданских и военных самолетов, судостроении. На рис. 5 показан наиболее точный из всех существующих на рынке ТИУС и трехосный ВОГ для космического применения ВОБИС (волоконно-оптическая безплатформенная инерциальная система).

*Рис. 4. БИНС на базе ВОГ с замкнутым контуром*

*Таблица 3*

**Параметры трехосных ИУС НПК «Оптолинк»**

| Параметры | ТИУС400 | ТИУС500 | ВОБИС |
|---|---|---|---|
| Диапазон измеряемой угловой скорости, °/сек | ±495 | ±400 | ±30 |
| Дрейф нулевого сигнала при постоянной температуре, °/ч | ≤0,1 | ≤0,1 | ≤0,025 |
| Погрешность масштабного коэффициента, % | ≤0,03 | ≤0,02 | ≤0,05 |
| Полоса пропускания, Гц (до 2 кГц) | ≥100 | ≥300 | ≥100 |
| Спектральная плотность мощности шума, $°/\sqrt{ч}$ | ≤0,01 | ≤0,01 | ≤0,0025 |
| Напряжение питания, В | 5±0,1 | 27±5 | 27 |
| Масса, кг | 0,7 | 1,1 | 2,6 |
| Габаритные размеры, мм | 80×95×62,5 | 110×110×92 | 172×176×110 |
| Выходной сигнал | RS – 485, RS – 422 | | |

*Рис. 5. ТИУС 500 и ВОБИС*

По результатам полного обзора существующих видов ВОГ, и сравнения их с параметрами из табл. 3 можно сделать вывод о том, что ВОБИС и ОИУС 5000 являются самыми высокоточными датчиками с характеристиками, приемлемыми для использования их в самых требовательных и сложных условиях: космические корабли и ракеты, самолеты, наземный транспорт специального назначения.

Заключение отмечу, что данное обзорное исследование является фундаментом для написания диссертационной работы по тематике ВОГ и исследовании точностных характеристик данного вида гироскопов.

**Библиографический список**

*1. Hervé C.* The Fiber-Optic Gyroscope, Second Edition. M.: Artech House, 2014. 489 p.

2. Научно-производственная компания «Оптолинк». Одноосные волоконно-оптические гироскопы. URL: http://www.optolink.ru/ru/products/single_axis_fog (дата обращения: 04.12.2021).

3. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом / В. Е. Прилуцкий, В. Г. Пономарев, В. Г. Марчук, М. А. Фенюк. URL: http://optolink.ru/volokonno-opticheskie-giroskopy-s (дата обращения: 21.06.2016).

4. ООО «Лазерные компоненты». URL: https://lasercomponents.ru/product/navigatsionnye-sistemy/komplektuyushhie-navigatsionnye-sistemy/giroskopy/volokonno-opticheskie-giroskopy/volokonno-opticheskij-giroskop-agilelight-100a-200a-300a (дата обращения: 04.12.2021).

5. ЗАО «Физоптика». Каталог стандартных датчиков. URL: https://www.fizoptika.ru/catalog (дата обращения: 05.12.2021).

6. ООО «Гиролаб». БИНС ВОГ с замкнутым контуром. URL: http:// gyrolab.ru/products/category/closed_loop_strapdown_inertial_navigation_systems (дата обращения: 08.12.2021).

## АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ

**УДК 004.932** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-193**

***С. О. Абабков****
*магистрант*
***Р. О. Малашин****
*кандидат технических наук*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММ

*Целью данной работы было решение проблемы стабилизации изображений фотоплетизмограмм с помощью алгоритмов поиска оптического потока. Был разработан алгоритм компенсации смещения. Работоспособность метода была экспериментально подтверждена.*
***Ключевые слова:*** *фотоплетизмограмма, оптический поток, стабилизация изображений.*

***S. O. Ababkov****
*Postgraduate Student*
***R. O. Malashin****
*PhD Sc. Tech.*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# METHOD FOR IMAGE STABILIZATION OF PHOTOPLETHYSMOGRAMS

*The aim of this work was to solve the problem of stabilizing the images of photoplethysmograms using optical flow search algorithms. An algorithm for offset compensation has been developed. The efficiency of the method has been experimentally confirmed.*
***Keywords:*** *photoplethysmogram, optical flow, image stabilization.*

## Введение

Фотоплетизмограмма это быстрый, надежный, неинвазивный метод диагностики. Он используется различными специалистами в терапевтической диагностике, эндокринологии, кардиологии, сосудистой хирургии, а также в различных исследованиях. Метод заключается в регистрации оптического сигнала, полученного в результате пропускания светового потока (СП).

Вследствие различия коэффициента пропускания у различных тканей и пульсирующего объема, которым является кровь, можно судить об изменении объема органов и тканей [1]. Даже незначительное движение исследуемого объекта (из-за дыхания или сердцебиения) приводит к изменению измеряемого коэффициента пропускания и возникновению артефактов.

Существует несколько различных методов идентификации подобных артефактов и стабилизации изображений: аппаратным способом, с привлечением специалиста, программным методом. Данная статья описывает метод программной стабилизации изображений с помощью алгоритмов поиска оптического потока.

В качества языка программирования был выбран Python вместе с популярной библиотекой OpenCV. В качестве исходных изображений для стабилизации были выбраны 3000 изображений мозга крысы.

## Алгоритмы и методы

Оптический поток (optical flow) – это изображение сдвига каждого пикселя между двумя изображениями, представляющее собой движение между изображениями.

Для того чтобы стабилизировать изображения, необходимо найти оптический поток между соседними кадрами, выбрать опорное изображение – то изображение, к которому мы будем приводить другое изображение, а после преобразовать второе изображение в систему координат опорного.

Смена системы координат второго изображения в координаты первого происходит с помо-

щью метода обратного проецирования данный метод берет пиксели из одного изображения и размещает их в другом месте нового изображения

$$dst(x, y) = src(map_x(x, y), map_y(x, y)),$$

где $src$ – исходное изображение, $dst$ – получившееся изображение, $map$ – карта отображения точек $(x, y)$ в другую систему координат, которая вычисляется из оптического потока. На рис. ниже представлены две вариации блок схем алгоритма программы стабилизации (рис. 1).

Алгоритм, представленный на рис. 1, принимает набор изображений, вычисляет оптический поток между соседними изображениями и производит стабилизацию изображений путем «оборачивания» текущего изображения в координаты предыдущего с использованием вычисленного оптического потока.

Откорректированное изображение записывается в файл, заменяя исходное изображение, и уже на следующей итерации берется скорректированное изображение и следующее за ним изначальное изображение.

Для обнаружения оптического потока был использован алгоритм DeepFlow. Данный алгоритм относится к алгоритмам оптического потока глубокого смещения. Он объединяет алгоритм глубокого сопоставления (Deep Matching) с подходами минимизации энергии.

Для расчета на каждом уровне пирамиды откликов используется разный вес, чтобы уменьшить вес каждого члена на более точных приближениях. Также добавляется нормализация в данные, чтобы уменьшить влияние частей изображения с большими значениями производной (рис. 2).

Таким образом, энергетическая функция представляет собой взвешенную сумму [2]:

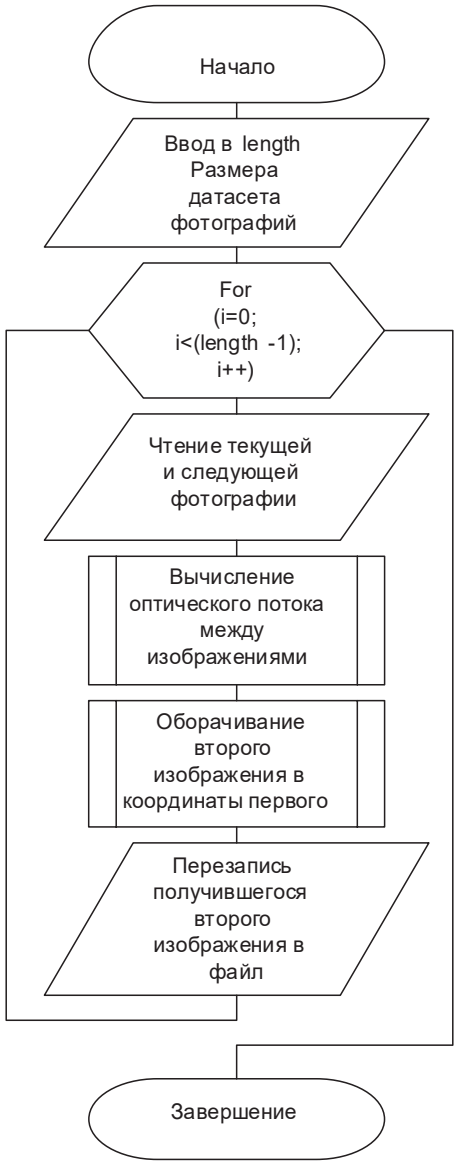



*Рис. 1. Блок-схема работы алгоритма с использованием оптического потока между соседними изображениями*

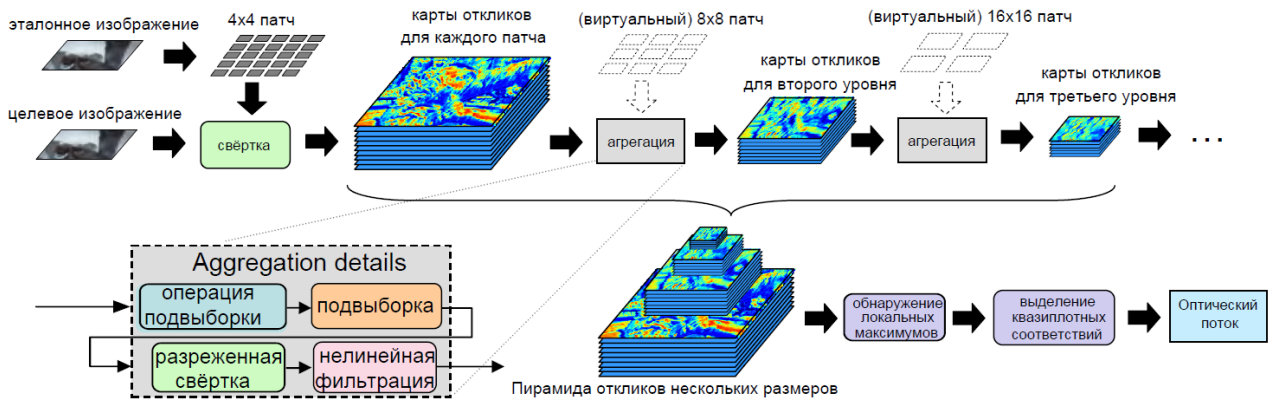



*Рис. 2. Общая структура вычисления для расчета оптического потока методом DeepFlow*

$$E(\omega) = \int_{\Omega} E_D + \alpha E_S + \beta E_S dx,$$

где $E_D = \Psi(\omega^{\mathsf{T}} J_0 \omega)$ – член данных, $J_0 = (\nabla_3 I)(\nabla_3^{\mathsf{T}} I)$ – тензор, $I$ – изображение, $\nabla_3 = \left(\partial x \partial y \partial t\right)^{\mathsf{T}}$ – пространственно-временной градиент, $E_S = \Psi(\|\nabla_u\|^2 + \|\nabla_v\|^2)$ – член гладкости, $E_M = c\phi\Psi(\|\omega - \omega'\|^2)$, – член согласования, $\phi(x) = \frac{\sqrt{\tilde{\lambda}(x)}}{\sigma_M \sqrt{2\pi}} e^{(-\frac{\Delta(x)}{2\sigma_M})}$ – вес, стандартное отклонение $\sigma_M = 50$, $\tilde{\lambda}(x)$ – минимальное собственное значение автокорреляционной матрицы, умноженное на 10, $\omega$ – текущее векторное поле (оптический поток), $\omega'$ – предварительно вычисленное поле.

Для всех трех членов используется функция потерь:

$$\Psi\left(s^2\right) = \sqrt{s^2 + \epsilon^2}, \text{ где } \epsilon = 0{,}001.$$

Член данных дает оценку в соответствии с согласованностью с большими значениями производной изображения. Член гладкости задается через норму градиента потока. Член согласования поощряет оценку потока, схожую с предварительно вычисленным векторным полем $\omega'$, штрафуя за разницу между $\omega'$ и $\omega$.

Функция энергии нелинейная и невыпуклая, для ее оптимизации в алгоритме используется фреймворк, предложенный Броксом и др [2], [3]. Стратегия – пошаговая трансформация от грубого к более точному с коэффициентом понижающей дискретизации $\eta = 0{,}95$. Применяется 5 итераций с внутренней фиксированной точкой, где нелинейные веса и приращения потока итеративно обновляются при исправлении. Для приближения линейной системы используется 25 итераций метода последовательной верхней релаксации (successive over relaxation, SOR). Для уменьшения значения соответствующего члена на более мелкой шкале используется метод, предложенный Столлом и др [2], [4], заключающийся в использовании различных весов на каждом уровне

$$\beta^k = \beta\left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^b,$$

где $b$ – параметр потока; $k$ – текущий уровень вычислений; $k_{\max}$ – номер самого грубого уровня.

DeepFlow имеет несколько преимуществ, а именно: устойчивость к выбросам (прекращение движения, засветки, окклюзии), устойчивость к изменениям освещенности (постоянство градиента), способность справляться с большими сдвигами.

## Результаты

С помощью оптического потока можно наглядно показать, что на паре исходных изображений в наблюдаемой нами области происходит смещение. Эта область на оптическом потоке изображена ярким красным цветом. Тогда как после стабилизации смещение в наблюдаемой области отсутствует, а движение отображено лишь в бликах и краевых искажениях, связанных с оборачиванием изображения (рис. 3).

Для того чтобы оценить точность разработанных методов стабилизации, предлагается использовать следующие метрики, описанные ниже.

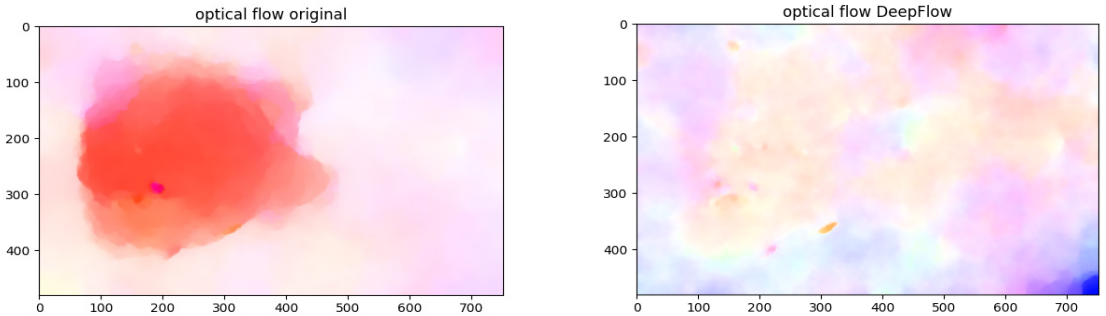



*Рис. 3. Визуализация оптического потока, рассчитанного между исходными изображениями (слева) и стабилизированными изображеями (справа)*

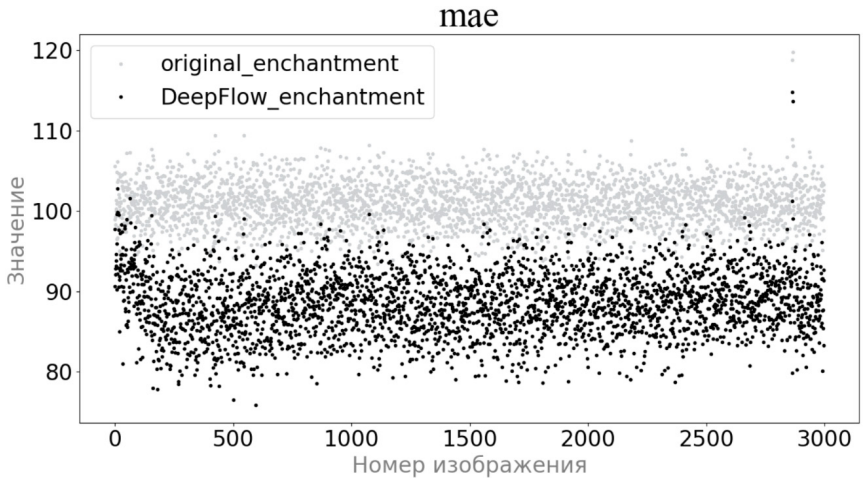



*Рис. 4. Значение средней абсолютной ошибки для датасета*

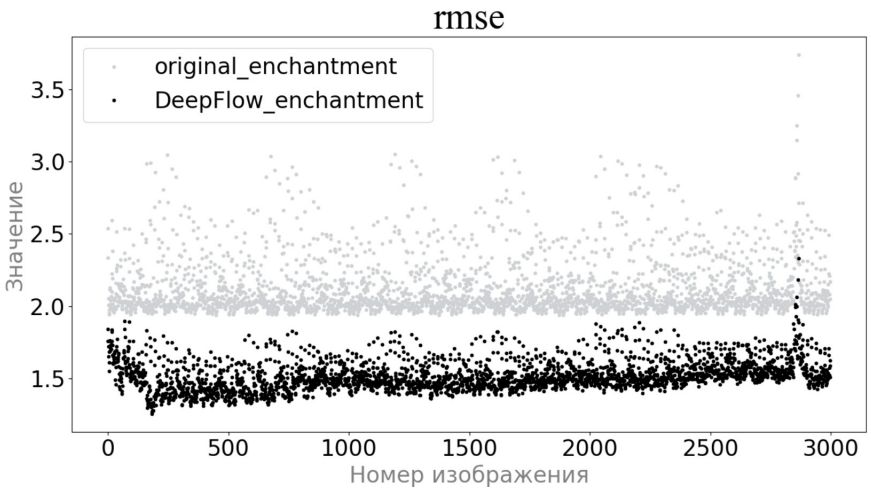



*Рис. 5. Значение среднеквадратичной ошибки для датасета*

Средняя абсолютная ошибка, которая вычисляется по формуле:

$$MAE = \frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}|\,a_{ij} - b_{ij}\,|,$$

где $a_{ij}$, $b_{ij}$ – координаты пикселей на первом и втором изображении; $m$ и $n$ – длина и ширина изображения.

Среднеквадратичная ошибка

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{mn}\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}(a_{ij} - b_{ij})^2},$$

где $a_{ij}$, $b_{ij}$ – координаты пикселей на первом и втором изображении; $m$ и $n$ – длина и ширина изображения.

Поскольку RMSE и MAE обозначают разницу между изображениями, то уменьшение получившегося значения свидетельствует о более близком сходстве изображений.

На рис. 4, 5 изображены графики MAE и RMSE для 3000 изображений из датасета. Серыми точками показаны значения до стабилизации, черными после стабилизации. По графикам видно, что значения уменьшились, что свидетельствует о том, что изображения стабилизировались.

Среднее значение MAE для датасета до стабилизации изображений – 101; после стабилизации методом DeepFlow – 88,6. Для RMSE значения следующие: до стабилизации – 2,1; после – 1,5.

## Заключение

В данной работы было предложен метод стабилизации изображений фотоплетизмограмм с помощью алгоритма оптического потока

Deepflow. Был разработан алгоритм компенсации движения, была проведена проверка работоспособности. Метод можно использовать для стабилизации набора данных любой размерности, что сэкономит время специалиста, избавляя его от необходимости вручную идентифицировать и корректировать артефакты движения.

**Библиографический список**

1. *Галкин М. А., Семикин Г. И.* Аппаратно-программное обеспечение диагностики сердечно-сосудистой системы человека с применением метода оптической плетизмографии высокого разрешения. М., 2013.

2. Deepflow: Large displacement optical flow with deep matching. In Computer Vision (ICCV), 2013 / P. Weinzaepfel, J. Revaud, Z. Harchaoui, C. Schmid // IEEE International Conference. 2013. P. 1385–1392.

3. High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping / T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg, J. Weickert // ECCV. 2004.

4. *Stoll M., Volz S., Bruhn A.* Adaptive integration of feature matches into variational optical flow methods // ACCV. 2012.

**УДК 378.148** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-198**

***Н. В. Барклаевская****
*старший преподаватель*
***О. М. Шарапова****
*старший преподаватель*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОПУЛЯРНЫХ ПАКЕТОВ DENWER И OPEN SERVER, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ WEB-САЙТОВ

*Рассмотрены характеристики и сравнение популярных пакетов, используемых при разработке динамических веб-приложений. Проблема рассмотрена как приложение к изучению дисциплин «Проектирование АСОИУ» и «Проектирование информационных систем с применением web-технологий» для бакалавров направления 09.03.01 и специалистов по направлению 09.05.01.*
***Ключевые слова:*** *локальный сервер Open Server, Denwer, PHP-MYSQL, программные модули WAMP, WNMP.*

***N. V. Barklayevskaya****
*Senior Lecturer*
***O. M. Sharapova****
*Senior Lecturer*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF POPULAR PACKAGES DENWER AND OPEN SERVER DESIGNED FOR CREATING WEB SITES

*The characteristics and comparison of popular packages used in the development of dynamic web applications are considered. The problem is considered as an application to the study of the disciplines «Design of ASOIU» and «Design of information systems using web technologies» for bachelors in the direction of 09.03.01 and specialists in the direction of 9.05.01.*
***Keywords:*** *Local server Open Server, Denwer, PHP-MYSQL, software modules WAMP, WNMP.*

В современном мире, в условиях пандемии использование интернет-технологий становится особенно актуальным. Данные технологии используются во всех сферах человеческой деятельности: в здравоохранении, в работе государственных и муниципальных предприятий, в обучении и т. д. [1], [2].

Существуют различные технологии создания web-приложений. Статические сайты содержат неизменяемые страницы, имеющие один контент для всех пользователей, для обновления информации на странице требуется создание новой страницы. Как правило, по такой технологии создаются веб сайты имеющие небольшое количество страниц и не требующие их частого обновления. Примером таких сайтов могут служить сайты визитки. Наиболее широкие возможности представляют так называемые динамические сайты, позволяющие отображать информацию с использованием реляционных баз данных. Преимуществом таких сайтов является: легкость обновления контента, возможность администрирования, интерактивность, возможность интеграции с существующими ИС. Одними из наиболее популярных средств создания динамических сайтов являются технологии PHP-MySQL и ASP.NET [1], [2].

В данной статье не будем останавливаться на технологии ASP.NET [1], [3], а уделим внимание разработке сайтов по технологии PHP-MySQL. Язык PHP (HypertextPreprocessor) служит для написания серверных сценариев или скриптов, главным его достоинством является открытость и бесплатность [1].

Для облегчения создания и отладки вебсайтов используются специализированные пакеты, которые имитируют работу веб-сервера и позволяют оценить корректность отображения созданных страниц. Такие пакеты обычно включают в себя веб-язык, веб-сервер, систему управления базами данных, почтовый сервер (WAMP) и ряд дополнительных модулей, позволяющих создать полноценный динамический сайт.

В настоящее время большой популярностью пользуются бесплатно распространяемые пакеты или платформы Denwer и Open Server. Следует отметить, что данные платформы являются отечественными разработками, которые очень хорошо зарекомендовали себя в сети интернет. Целью данной статьи будет сравнение этих пакетов, используемых при разработке динамических веб-приложений как для профессионалов, так и для обучения студентов в высших учебных заведениях.

Denwer является самой популярной платформой для web-разработки. Главными его достоинствами являются простота в настройке и работе. Его рекомендуют для работы многим начинающим web-мастерам, для которых лучше всего будет начинать работу с простого и удобного локального сервера. «Джентльменский набор» Denwer'а включает в себя необходимый и весьма широкий список программных модулей, используемых при web-разработках. Важной особенностью данного пакета является малый вес (несколько мегабайт), позволяющий уместить его даже на флэш-носителе [4]. К сожалению, разработчики Denwer на какое-то время остановили дальнейшую разработку и обновление пакета. Но в настоящее время проводится реорганизация пакета.

Локальный сервер Open Server предназначен для работы на ОС Windows и включает в себя как набор программных модулей WAMP (Windows, Apache, MySQL, PHP), так и WNMP (Windows, Apache или Nginx, MySQL, PHP). Сервер может применяться на платформе Linux. Open Server – это относительно новый, быстро набирающий обороты, проект, в котором используются последние версии web-серверов и других необходимых элементов для веб-разработки. Платформу Open Server «популизирует» наличие графического интерфейса, значительно повышающего работу с локальным сервером [4].

Существует два вариантов комплектации FULL и BASIC. В состав основных компонентов входит набор, представленный на рис. 1.

Комплектация BASIC (MINI) – представляет собой версию пакета DENWER и имеет вес 3,48 ГБ. Полная версия FULL имеет вес 5,81 ГБ и имеет в своем арсенале к основному комплекту, дополнительный, представленный на рис. 2.

Рассмотрим сравнение локальных серверов по следующим критериям: установка, (настройка), запуск, работа с БД, отладка и тестирование сайта. Данные критерии являются основополагающими, так как без этого нельзя создать полноценный web-сайт.

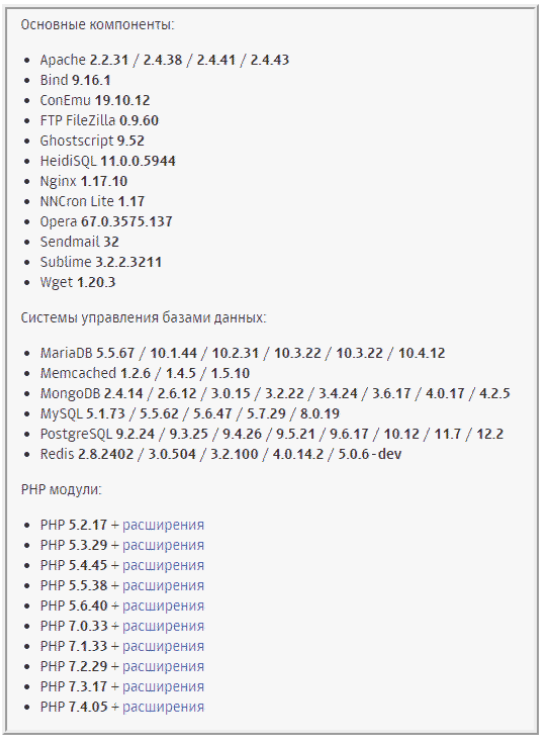



*Рис. 1. Основные компоненты*

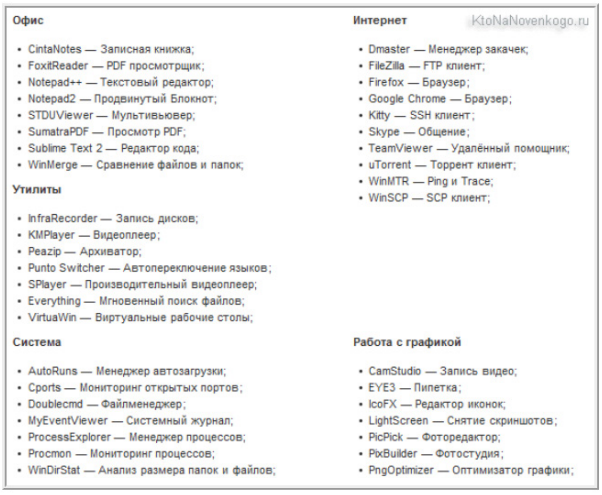



*Рис. 2. Набор дополнительных компонентов при комплектации FULL*

Обзор критериев представлен в табл. 1.

Основные достоинства пакета Denwer:

– малый объем и в связи с этим использование разных носителей;

– использование любых браузеров для отладки сайта;

– простота в работе.

Основные недостатки пакета Denwer:

– нет обновления пакета на данный момент. Есть варианты обновления отдельных компонентов и ручная сборка пакета;

*Таблица 1*

**Сравнение серверов Denwer и Open Server**

| Критерии | Open Server | Denwer |
|---|---|---|
| Установка | Обычная установка приложений | С помощью командной строки |
| Настройка | Графическое окно с вкладками (рис. 3)<br>Настройка нескольких портов (рис. 4) | Файл конфигурации, который необходимо редактировать вручную.<br>Использование только 80 порта |
| Запуск | Через панель, установленную в панели задач (рис. 5) | Через адресную строку браузера |
| Работа с БД | Графическое приложение PHPMYADMIN | Графическое приложение PHPMYADMIN |
| Отладка и тестирование | Отладка PHP кода осуществляется с помощью редактора, настраиваемого через окно настройки. Входит в состав расширенного пакета FULL. Тестирование сайта через браузер OPERA (по умолчанию). Можно добавлять другие браузеры | Для отладки кода PHP необходимо предварительно устанавливать и запускать редактор. Тестирование сайта можно осуществлять любым браузером, установленным пользователем |

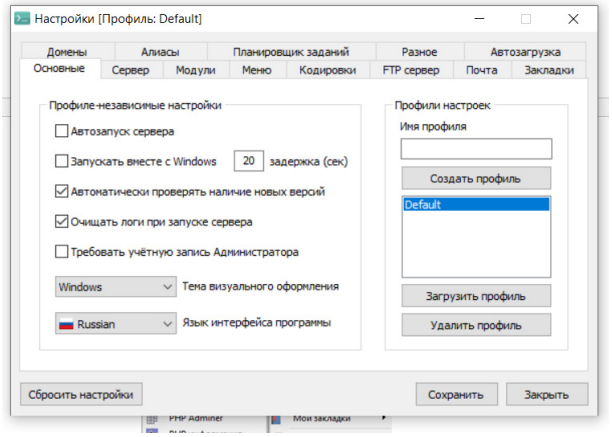



*Рис. 3. Окно настройки*

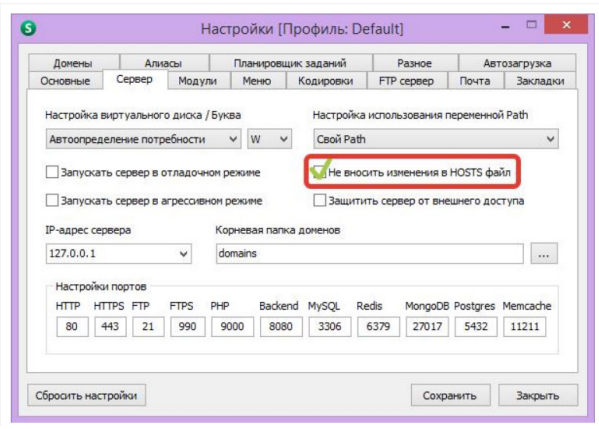



*Рис. 4. Настройка портов через окно настройки*

– нет совместимости при использовании разных версий пакета;

– ручная настройка файла конфигурации;

– нет графического интерфейса при отладке сайта.

Основные достоинства пакета Open Server:

– настройка пакета осуществляется через графическое окно;

– настройка нескольких портов (рис. 4);

– запуск и Отладка сайта осуществляется через графический интерфейс;

– отладка кода PHP осуществляется через встроенный в пакет редактор (при использовании расширенного пакета FULL);

– возможность работать с разными версиями пакета;

– частое обновление пакета.

Основные недостатки пакета Open Server:

– достаточно большой размер, включающий в себя различные модули для расширенной реализации сайта;

– использование только браузера (Opera) по умолчанию, который устанавливается вместе с пакетом; при этом есть возможность перенастройки на другие браузеры.

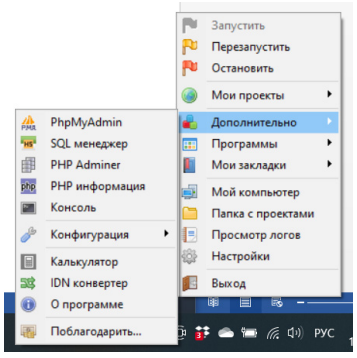



*Рис. 5. Графический интерфейс отладки сайта*

Таким образом, учитывая достоинства и недостатки пакетов следует отметить, что использование Open Server не предполагает полного отказа от Denwer или любого другого пакета, например XAMPP. Все пакеты достаточно портативны и могут существовать параллельно, не мешая друг другу. Каждый инструмент имеет свою нишу. Open Server, возможно, более удобен для стационарной разработки, со множеством подключаемых модулей и программного обе-

спечения. Denwer более мобильный и легкий, умещающийся на флэшку в 250 мб или на смартфон. В любом случае – это лишь оболочка. Оба локальных сервера предоставляют главное – работу с сайтом здесь и сейчас. Дело за вашим выбором [5].

**Библиографический список**

1. *Барклаевская Н. В., Шарапова О. М.* Методика обучения студентов созданию сайтов. СПб.: ГУАП, 2017. С. 8–9.

2. *Барклаевская Н. В., Лахманова И. Е.* Разработка веб-сайтов с использованием MS Visual Studio // Государство и бизнес. Современные проблемы экономики. 2016. С. 149–152.

3. *Барклаевская Н. В., Шарапова О. М.* Сравнение технологий ADO.NET LINQ to SQL при разработке веб-сайтов. СПб.: ГУАП, 2019. С. 173–181.

4. URL: https://aveweb.ru/article/read/Obzor-lokalnyh-serverov-Denwer-vs-Open-Server.html (дата обращения: 13.11.2021).

5. URL: https://ktonanovenkogo.ru/wordpress/openserver-lokalnyj-server-ustanovki-wordpress-na-kompyutere.html (дата обращения: 20.11.2021).

**УДК 004.02** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-202**

***С. И. Ковалев****
*кандидат технических наук, доцент*
***П. О. Винарь****
*магистрант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ LDPC-КОДОВ С БОЛЬШИМ МИНИМАЛЬНЫМ ОБХВАТОМ

*Рассматриваются методы построения оптимальных низкоплотностных кодов с весом столбца проверочной матрицы равным 2. Доказано, что обхват в проверочной матрице равен двум минимальным расстояниям. Осуществлен переход в построении проверочной матрицы без коротких циклов к построению с заданным минимальным расстоянием. Показаны различные способы построения.*
***Ключевые слова:*** *низкоплотностные коды, LDPC-код, оптимальные коды, циркулянтные матрицы, избыточность.*

***S. I. Kovalev****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***P. O. Vinar****
*Postgraduate Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# THE CONSTRUCTION OF LOW-DENSITY PARITY-CHECK CODES BASED ON THE GRAPH CELLS

*Methods of constructing optimal low-density codes with a column weight of the verification matrix equal to 2 are considered. It is proved that the girth in the verification matrix is equal to two minimum distances. The transition in the construction of the test matrix without short cycles to the construction with a given minimum distance has been carried out. Various methods of construction.*
***Keywords:*** *low-density codes, LDPC, optimal codes, circulant matrices, redundancy.*

## Введение

Коды с низкой плотностью проверки на четность были предложены Галлагером в 1960-х годах. После повторного открытия кодов с малой плотностью проверки на четность (LDPC-код) в 1990-х годах [1], большое внимание было уделено на их разработку. Были выделены различные подклассы таких кодов. Действительно, благодаря их пропускной способности, а также их алгоритму декодирования LDPC-коды были приняты в качестве стандартных кодов для различных поколений связи [2]. Они стали применяться для различных систем хранения данных, таких как флеш-память.

LDPC-коды могут быть описаны графами Таннера [3]. Таннер обобщил LDPC-коды Галлагера на двудольных графах, известными как графы Таннера, а также разработал два общих алгоритма, которые называются алгоритмами минимальной суммы и sum-product. Для графов без какого-либо определенного цикла оба алгоритма являются оптимальными [4]. Длина самого короткого цикла в таком графе называется обхватом графа и обозначается через $g$ [4]. Графы Таннера с большим обхватом актуальны по нескольким причинам. Во-первых, чем больше g, тем больше итераций оптимального декодирования. Во-вторых, для разработки LDPC-кодов с большим обхватом связана с минимальным расстоянием кода. Таннер вывел границу минимального расстояния $d_{\min}$; эта нижняя граница экспоненциально увеличивается с обхватом $g$. Поэтому LDPC-коды с большим обхватом – это хорошие коды [5].

Разработка регулярных структурированных LDPC-кодов с произвольным большим обхватом и некоторыми скоростями кодирования попрежнему остается актуальной проблемой, которая до сих пор решается. В течение нескольких последних лет многие исследователи работают над разработкой коротких LDPC-кодов

с большими обхватами, поскольку этот подход может привести к разработке оптимальных LDPC-кодов для короткой длины.

## Минимальное расстояние LDPC-кода

У кодов с низкой плотностью проверки на четность имеется важное свойство: цикл в проверочной матрице должен быть не меньше 4 или обхват должен быть не меньше 2. При несоблюдении такого важного условия можно получить зависимые строки в проверочной матрице, которая будет являться не оптимальной.

Теорема. Матрица H размера $M \times N$ с обхватом $g$ задает код с минимальным расстоянием $d_{\min} = g/2$.

Доказательство. Представим проверочную матрицу LDPC-кода размера $M \times N$ в виде графа. Тогда, если в графе существуют петли обхвата $g$, то они должны содержать $g/2$ переменных узлов и $g/2$ контрольных узлов. Если количество строк в матрице равно двум, и вес столбца также равен 2, тогда столбцы этих переменных узлов цикла $g/2$ являются линейно зависимыми. Следовательно, расстояние между строками равно $g/2$. Отсюда получаем, что $d_{\min} = g/2$ [6].

## Методы построения оптимальных кодов с заданным минимальным расстоянием

Традиционно при построении проверочных матриц LDPC-кодов. Используются графы Таннера [3]. В [4] нами были предложены для построения проверочных матриц кодов использовать совершенные разностные множества, что позволило строить коды с заданным минимальным расстоянием. В этой работе мы представляем новые методы, которые позволяют строить проверочные матрицы для оптимальных кодов.

Известные методы построения проверочных матриц LDPC-кодов можно разделить на два класса: случайные (неструктурированные соединения столбцов или строк) и структурированные, позволяющие строить матрицы, в которых каким-либо образом определены соединения строк или столбцов.

Случайные конструкции обладают гибкостью в проектировании и построении, но у них нет регулярности в соединениях, что увеличивает сложность вычислений. Структурированные конструкции могут иметь регулярные схемы взаимосвязи, но чаще всего это определенный класс кодов, которые ограничены по скорости, длине и обхвату.

Как было сказано ранее случайные коды соединяют строки и столбцы в матрице LDPC-кода без какой-либо структуры. На самом деле – это псевдослучайные последовательности, которые реализованы с помощью программных реализаций. При этом обязательно нужно накладывать условие на добавление строки или столбца, который не должно нарушать размер обхвата или вес строки, или столбца. Случайные коды обладают хорошей производительностью, особенно при больших длинах кода по сравнению со структурированными кодами [6]. Случайные методы построения могут быть использованы для максимизации производительности (например, по обхвату) и скорости для определенного размера матрицы.

Определение. Оптимальными матрицами LDPC-кода называются матрицы, у которых минимальное расстояние больше 8.

В качестве примера рассмотрим структурированную конструкцию проверочной матрицы с $g = 2$ и минимальным расстоянием равным 4 (рис. 1). Для таких проверочных матриц размер никак не ограничен, так как строки в такой матрице при сложении будут линейно зависимыми, поскольку единицы расположены в одной строке. Матрицы называются не оптимальными, и такая структура накладывает дополнительное условие проверки на построение.

Как было сказано выше, оптимальные матрицы имеют цикл, который больше 8. Например, проверочную матрицу можно построить с помощью подматриц циркулянтов. Алгоритм построения LDPC-кода следующий:

1. Разделим матрицу H размера $2*N \times N^2$ (где $N \times N$ – это размер подматрицы) на две полосы. В первой полосе содержатся единичные матрицы $I$, где на главной диагонали стоят единицы.

2. Вторая полоса будет состоять из матриц перестановок. Первая подматрица будет единичная, а остальные будут сдвинуты на одну позицию вправо или влево.

3. Сдвиг будет выполняться $N$–1 раз.

Длина такой проверочной матрицы будет равна $N=Mk$, где $M$ – количество строк проверочной матрицы; $k$ – минимальный размер цир-

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

*Рис. 1. Пример проверочной матрицы с циклом равным 4*

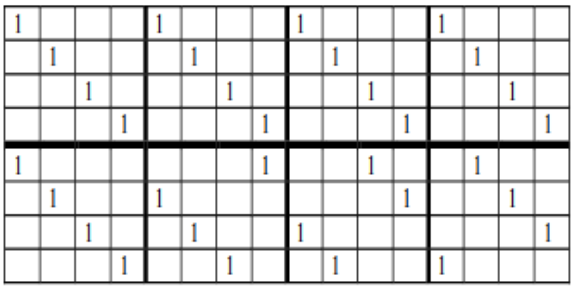


*Рис. 2. Пример проверочной матрицы с циклом не менее 8*

кулянта [4]. Проверочная матрица представлена на рис. 2.

Осуществлять построение проверочной матрицы можно с помощью совершенных разностных множеств. Минимальный цикл в такой матрице будет равен 12. Алгоритм построения аналогичен с матрицами циклических перестановок. Разница состоит лишь в том, что в таком построении будет заранее определен сдвиг единицы во второй полосе, так как его определяет совершенное разностное множество. Минимальная длина для такого обхвата будет равна: $k$ ($k^2$–$k$+1), где $k$ – это размер строки или столбца подматрицы. Пример проверочной матрицы LDPC-кода представлен на рис. 3, где $I$ – единичная подматрица; $C_k$ – подматрица с индексом совершенного разностного множества.

В компактном виде матрица из рис. 3 представляется в виде:

| | | |
|---|---|---|
| I | I | I |
| C0 | C1 | C3 |

Еще одним методом построения является проверочная матрица с минимальным циклом равным 16. Проверочную матрицу строим по следующему алгоритму:

1. Разделим матрицу H размера 2*$N$×$N^2$ (где $N$×$N$ – это размер подматрицы) на две полосы.

| | | |
|---|---|---|
| I | I | I |
| I | Generate rows | |

*Рис. 4. Компактный вид матрицы*

В первой полосе содержаться единичные матрицы I, где на главной диагонали стоят единицы.

2. Вторая полоса состоит из столбцов, которые подставляются из генератора. Учитываем, что первые $N$ столбцов – единичная матрица. Подстановку выполняем до тех пор, пока не найдем длину проверочной матрицы с минимально заданным циклом. Столбцы которой подбираются из генератора

При построении проверочной матрицы с циклом равным не менее 16, требуется избегать циклов длиной 4, 8 и 12, иначе мы получаем внутренние короткие циклы, поэтому не требуется рассматривать циклы $4m$+2, где $m$ – любое целое число, больше 1.

Данный алгоритм строит проверочную матрицу. Компактный вид такой матрицы изображен на рис. 4, где **I** – единичные матрицы; *Generate rows* – генерация столбцов.

## Заключение

Мы рассмотрели три алгоритма построения проверочных матриц LDPC-кодов, которые позволили получить матрицы с обхватами 8, 12 и 16. Такие матрицы хорошо структурированы. Кроме того, они превосходят матрицы, которые были ранее построены случайным образом. При увеличении обхвата в проверочных матрицах, а также параметра $N$, сложность вычислений увеличивается не слишком быстро. Поэтому матрицы LDPC-кода, построенные по данным алгоритмам, считают оптимальными.

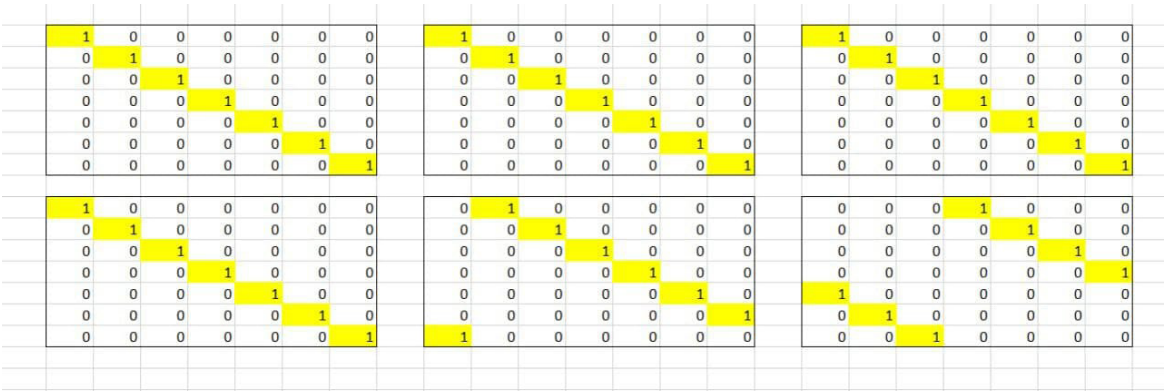


*Рис. 3. Пример проверочной матрицы с циклом не менее 12*

**Библиографический список**

1. *MacKay D., Neal R.* Near Shannon limit performance of low density parity-check codes // Electron. Lett. 1996. Vol. 32. N 18. P. 1645–1646.

2. *Feldman J., Wainwright M., Karger D.* Using Linear Programming to Decode Binary Linear Codes // IEEE Transactions on Information Theory. 2005. Vol. 51. P. 954–972.

3. *Tanner R.* A recursive approach to low complexity codes // IEEE Trans. Inf. Theory. 1981. Vol. IT-27. N 5. P. 533–547.

4. *Ковалев С. И., Винарь П. О.* Об одном методе построения низкоплотностных кодов из графов клеток // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии. 2021. С. 279–283.

5. *Kschischang F., Frey B., Loeliger H.* Factor graphs and the sum-product algorithm // IEEE Trans. Inf. Theory. 2001. Vol. 47. N 2. P. 498–519.

6. *Wei L.* Several properties of short LDPC codes // IEEE Transactions on Communications. 2004. Vol. 52. N 5. P. 721–727.

**УДК 004.932.2** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-206**

***П. В. Кочетков****
*студент*
***В. Р. Луцив****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЖЕСТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВОЙ АУДИО-, ВИДЕОТЕХНИКОЙ

*Разработан и практически реализован в виде прикладного программного обеспечения метод управления бытовой аудио-, видеотехникой при помощи жестов, позволяющий регулировать громкость в режиме реального времени.*
***Ключевые слова:*** *анализ изображений, управление жестами.*

***P. V. Kochetkov****
*Student*
***V. R. Lutsiv****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# AUTOMATIC ANALYSIS OF GESTURES FOR SOLVING PROBLEMS OF CONTROL OF HOUSEHOLD AUDIO-, VIDEOEQUIPMENT

*A method for controlling the household audio-, videoequipment using gestures has been developed and practically implemented in the form of application software, which allows adjusting the volume in real time.*
***Keywords:*** *image analysis, gesture control.*

## Введение

На всех этапах развития вычислительной техники отмечается совершенствование методов взаимодействия человека и компьютера. В частности, в настоящее время интенсивно разрабатываются «дружественные» и более естественные алгоритмы общения человека с компьютером, такие как человеко-машинные интерфейсы (ЧМИ) [1], перцептивные пользовательские интерфейсы (ППИ) [2] и т. п.

В рамках этой тенденции в последние годы появились и быстро развиваются технологии использования жестов, особенно жестов руки, как способа взаимодействия с компьютерной системой. Распознавание жестов, таким образом, стало важнейшей частью ЧМИ и начало привлекать множество исследователей. Эти технологии находят применение в таких областях как управление оборудованием, телеконференции, перевод языка жестов (для людей с ограниченными возможностями), управление компьютерными играми, и т. д.

## Современные аналоги

Для использования человеческой руки в качестве естественного средства взаимодействия с компьютером, применялись, в частности, «перчатки данных», такие как Киберперчатка (CyberGlove) [3], [4]. Параметры пространственной ориентации и положения руки могут быть измерены непосредственно перчаткой с помощью встроенных датчиков. Однако перчатка данных и прилагаемые к ней провода неудобны для практического применения пользователями. Кроме того, стоимость перчатки данных часто слишком высока для широкой пользовательской аудитории.

Разработанный фирмой Microsoft комплекс Kinect позволяет пользователю взаимодействовать с игровой приставкой Xbox 360 без помощи игрового контроллера через устные команды, позы тела и показываемые объекты или рисунки. Этот игровой «контроллер без контроллера» представлен для консоли Xbox 360. Комплекс Kinect использует специальное периферийное

устройство ZCam, которое является разновидностью время-пролетной камеры (Time-of-Flight Camera), позволяющей получать трехмерную видеоинформацию. Необходимость использования специального дорогого устройства и особенности его практической реализации также ограничивают возможности широкого использования Kinect.

Среди различных подходов к решению задачи распознавание жестов на основе компьютерного зрения оказывается ведущей тенденцией благодаря новым достижениям в области компьютерного зрения, повышенной производительности компьютеров, а также популярности и высокого качества недорогих видеокамер. При этом важным является тот факт, что системы распознавания жестов на основе компьютерного зрения обеспечивают более интуитивный и натуральный канал взаимодействия человека с компьютером. Кроме того, видеокамера представляет собой недорогое (по сравнению с другими типами датчиков, рассмотренными, например, выше) и удобное устройство ввода информации, которое может служить эффективным каналом связи при реализации взаимодействия человека и машины. В связи с этим для реализации автоматического анализа жестов были выбраны именно методы компьютерного зрения.

## Материалы и методы исследования и разработки

Для реализации работы программы была взята за основу библиотека MediaPipe [5], материалы которой можно найти в Github. MediaPipe использует конвейер машинного обучения, состоящий из нескольких моделей, работающих совместно: модель обнаружения ладони, которая работает с полным изображением и возвращает ориентированную ограничивающую рамку руки, модель «опознавательных точек ладони», которая работает с вырезанной областью изображения, определенной детектором ладони, и возвращает точные ключевые точки руки.

Предоставление точно вырезанного изображения руки для модели опознавательных точек ладони резко снижает потребность в увеличении объема анализируемых данных (например, вращении, перемещении и масштабировании) и вместо этого позволяет нейронной сети, выполняющей анализ жестов, направить большую часть своих возможностей на точность прогнозирования координат ключевых точек ладони.

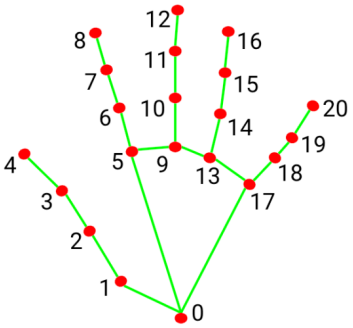
Для определения начального местоположения рук применяется модель однократного детектирования, оптимизированная для мобильного использования в реальном времени. Обнаружение рук – сложная задача: модель должна работать с различными масштабами изображений рук и уметь обнаруживать загороженные и «самозагораживающиеся» ладони. Отсутствие высококонтрастных особенностей (таких как области глаз и рта на лице) усложняет задачу обнаружения. Вместо этого предоставление дополнительного контекста, такого как особенности руки, тела или человека, помогает точной локализации руки.

Алгоритмы, используемые в данной библиотеке, решают указанные выше проблемы с применением различных стратегий. Во-первых, используется детектор ладони целиком, поскольку оценивать ограничивающие рамки объектов «жесткой формы», таких как ладони и кулаки, значительно проще, чем обнаруживать руку, включающую отдельные сочлененные пальцы. Кроме того, поскольку ладони представляют собой более мелкие объекты по сравнению с размером всего изображения, «алгоритм не максимального подавления» обеспечивает надежную работу даже для случаев самозагораживания, таких как при рукопожатии. Более того, ладони можно обнаруживать в квадратных ограничивающих рамках (якорях в терминологии машинного обучения), игнорируя другие возможные соотношения сторон рамки, и, следовательно, уменьшая количество анализируемых вариантов рамок (якорей) в 3–5 раз. Во-вторых, используется обнаружитель признаков с архитектурой энкодер-декодер, обеспечивающий использование более обширной информации о контексте сцены даже при анализе небольших объектов.

С помощью описанных выше методов достигается средняя точность обнаружения ладони 95,7 % (в сравнении с базовым подходом, основанным на использовании показателя кросс-энтропии и не использующим декодера, обеспечивающим точность всего 86,22 %).

При решении в рамках настоящей разработки проблемы автоматического анализа изображений жестов в целях управления оборудованием средствами библиотеки MediaPipe на кадрах видеопотока было выделено изображение ладони, получен каркас кисти руки и обозначены ключевые точки, соответствующие суставам (рис. 1).

Регулировка громкости жестом осуществляется движением большого и указательного пальцев: программа измеряет расстояние между точками «4» и «8», как показано на рис. 2 и на скриншоте, приведенном на рис. 3. Это осу-




0. WRIST
1. THUMB_CMC
2. THUMB_MCP
3. THUMB_IP
4. THUMB_TIP
5. INDEX_FINGER_MCP
6. INDEX_FINGER_PIP
7. INDEX_FINGER_DIP
8. INDEX_FINGER_TIP
9. MIDDLE_FINGER_MCP
10. MIDDLE_FINGER_PIP
11. MIDDLE_FINGER_DIP
12. MIDDLE_FINGER_TIP
13. RING_FINGER_MCP
14. RING_FINGER_PIP
15. RING_FINGER_DIP
16. RING_FINGER_TIP
17. PINKY_MCP
18. PINKY_PIP
19. PINKY_DIP
20. PINKY_TIP

*Рис. 1. Обозначение ключевых точек при распознавании изображения ладони*

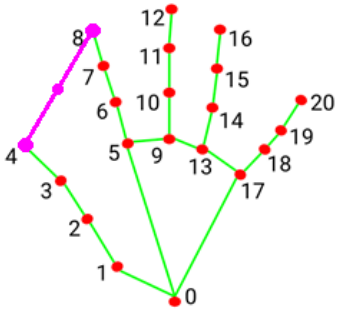



*Рис. 2. Обозначение точек при измерении расстояния, соответствующего уровню громкости аудиоустройства*

ществляется при помощи написанного в рамках данной разработки метода «findDistace, в котором осуществляется отрисовка наглядной лини регулирования и вычисление ее длины. При помощи библиотеки «numpy» производится межкадровая интерполяция полученного расстояния для того, чтобы можно было соотнести полученные значения и параметры регулятора громкости на устройстве. Данное действие осуществляется при помощи метода «interp» из данной библиотеки. Фиксирование результата изменения громкости и установка на аудиоустройстве соответствующего ее значения происходит при сгибании «мизинца», то есть когда точка «20» становится ниже, чем точка «18» (рис. 4). Проверка на «согнутый» или «поднятый» палец осуществляется при помощи метода, созданного в рамках данного исследования «fingersUp», где происходит проверка положения ключевых точек относительно друг друга. Непосредственное взаимодействие с оборудованием, а именно регулировка громкости на ноутбуке, осуществляется при помощи функций и методов библиотек «ctypes», «comtypes», «pycaw. pycaw» языка Python, взаимодействующих с собственными библиотеками Windows. С их помощью появляется возможность получить данные о текущих показателях «движка» регулировки громкости и осуществить требуемое изменение данного параметра. В экспериментах для ввода изображения использовалась встроенная вэб-камера ноутбука, на котором выполнялось распознавание жестов.

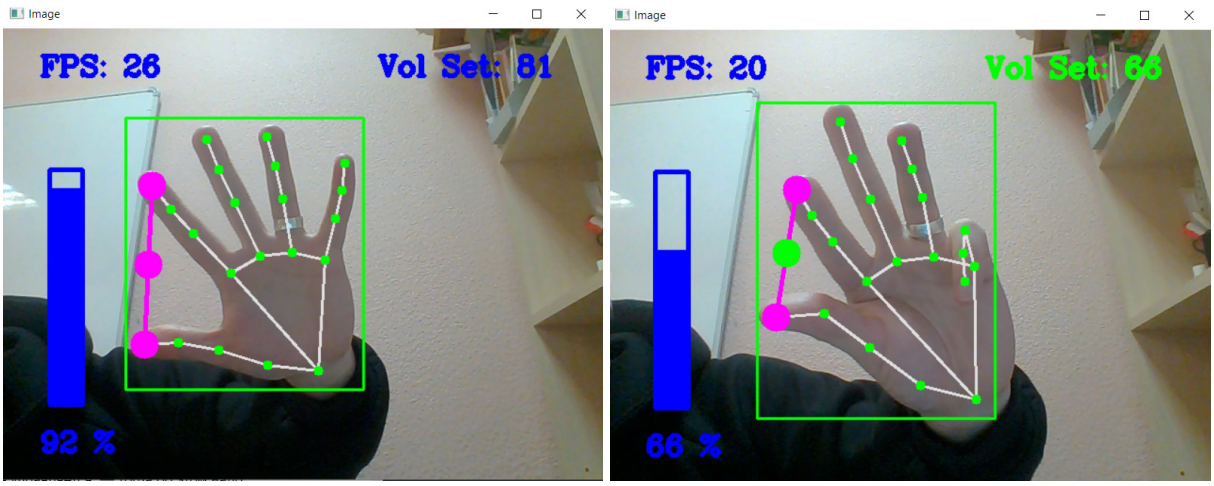



*Рис. 3. Увеличение и уменьшение громкости воспроизведения звука разведением (слева) и сведением (справа) большого и указательного пальцев соответственно*

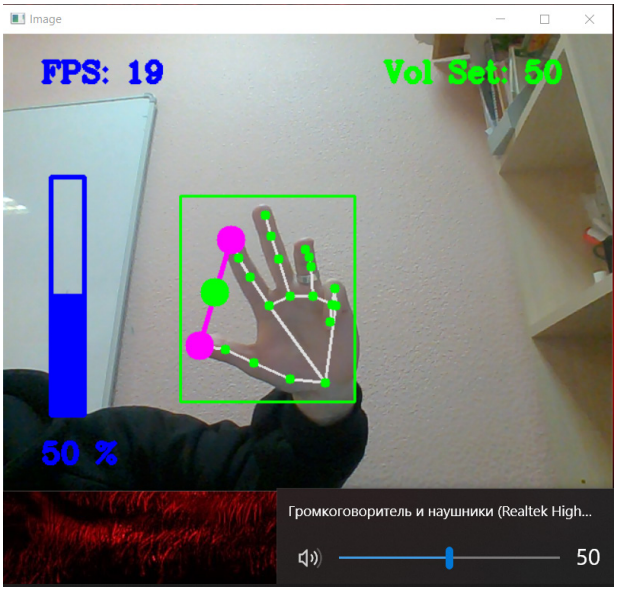



*Рис. 4. Фиксирование отрегулированного уровня громкости жестом «сгибание мизинца»*

Для предотвращения некорректного срабатывания алгоритма анализа жестов введены ограничения на расстояние, на котором будет осуществляться работа программы. Ограничения реализуются при помощи сравнения площади ладони, обнаруженной на изображении, с заданными минимальным и максимальным ее пороговыми уровнями.

## Заключение

В результате проведенного исследования был разработан и практически реализован в виде прикладного программного обеспечения метод управления бытовой аудио-, видеотехникой при помощи жестов, позволяющий регулировать громкость в режиме реального времени, который является более простым и дешевым с точки зрения реализации по сравнению с существующими на рынке аналогами.

## Библиографический список

1. *Гэдбоа М., Келли Ч.* / Пер. В. Рентюка. HMI как интеллектуальные периферийные устройства. М., 2021. С. 52.

2. *Сейидов В.* Что такое интерфейс пользователя? URL: https://www.internet-technologies.ru/articles/newbie/polzovatelskiy-interfeys.html (дата обращения: 08.11.2021).

3. URL: https://clck.ru/YmKQt (дата обращения: 10.11.2021).

4. ООО «Альтаир». URL: https://www.arms-expo.ru/armament/samples/875/61756/ (дата обращения: 11.11.2021).

5. Mediapipe. URL: https://github.com/google/mediapipe (дата обращения: 15.10.2021).

**УДК 4.93** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-210**

***В. Р. Луцив****
*доктор технических наук, профессор*
***Д. И. Гребенщиков****
*магистрант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ

*Разработаны и программно реализованы алгоритмы обнаружения и подсчета по аэрокосмическим снимкам ТС, находящихся на проезжей части дорог, позволяющие анализировать в реальном масштабе времени загруженность автомобильных магистралей. Обнаружение дорог и транспортных средств выполняется специально обученными сверточными нейронными сетями.*
***Ключевые слова:*** *анализ дорожно-транспортной обстановки, обнаружение транспортных средств, обнаружение дорог, сверточные нейронные сети, аэрокосмические снимки.*

***V. R. Lutsiv****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
***D. I. Grebenshcikov****
*Postgraduate Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR MONITORING OF TRAFFIC SITUATION BASED ON AEROSPACE PHOTOGRAPHS

*The algorithms for vehicles detection and counting in the roads are developed and implemented in software, which enables the real time monitoring of road traffic situation. The roads and vehicles are detected by the specially trained convolutional neural networks.*
***Keywords:*** *analysis of road traffic situation, vehicle detection, road detection, convolutional neural networks, aerospace photographs.*

## Введение

С каждым днем все больший интерес вызывает идея умных городов с их автоматизированными интеллектуальными энергетическими системами, портами доступа в одно касание, интеллектуальными комплексами обнаружения распознавания и слежения. Одна из основных составляющих умного города – автоматизированное управление дорожным движением. Сверточные нейронные сети (СНН) как современный эффективный инструмент автоматизации анализа данных и принятия решений находят все более широкое применение при решении таких сложных и актуальных задач.

Тема настоящего исследования связана с мониторингом дорожно-транспортной ситуации по данным спутникового наблюдения. Решение этой проблемы могло бы помочь оценивать следующие важные показатели дорожного движения:

– время, в которое нарастает трафик;

– виды транспортных средств (ТС), которые проезжают через перекрестки (грузовые, специальные и легковые автомобили);

– пути оптимизации трафика и перераспределения его по другим улицам;

– количество ТС на перекрестке в час пик и т. п.

Для того чтобы оценивать дорожную обстановку и загруженность транспортных магистралей, необходимо решить следующие задачи:

– обнаружение ТС по данным спутникового наблюдения;

– выделение на спутниковых снимках пикселов, относящихся к проезжей части дорог;
– подсчет ТС, которые находятся на дороге.

## Выбор инструментов обнаружения транспортных средств

Обнаружение объектов является одним из самых распространенных типов задач, решаемых методами машинного обучения. Для решения этой задачи разработано несколько эффективных архитектур СНН. С целью выбора наиболее эффективной обратимся к статье [1], авторы которой обучали различные СНН на одном и том же наборе данных. Полученные ими показатели точности обнаружения объектов приведены на рис. 1, из которого видно, что Scaled-YOLOv4 – это одна из самых точных и быстрых одноступенчатых моделей на сегодняшний день. Она имеет несколько вариаций, которые отличаются количеством слоев и, соответственно, скоростью работы и точностью. В настоящем исследовании использована сеть Scaled-YOLOv4-P5 [2] как оптимальная по указанным выше критериям.

## Экспериментальные данные и обучение сети обнаружению транспортных средств

Для обучения нейронной сети был выбрана база данных VEDAI [3]. Это набор данных для обнаружения ТС на аэрофотоснимках. В наборе можно найти ТС очень малых размеров, база данных также демонстрирует естественную изменчивость наблюдаемых объектов: разнообразные ракурсы наблюдения, изменения освещенности и тени, зеркальные отражения и окклюзии. В наборе представлены 12 классов объектов: легковой автомобиль, грузовик, пикап, трактор, машина для кемпинга, лодка, мотоцикл, автобус, фургон, другие малые и большие ТС. Данные были разделены на тренировочную и валидационную части случайным образом в пропорции 80 к 20 %.

Обучение сети выполнялось в течение 100 эпох. После 87 эпохи используемая метрика оценки качества mAP (mean Average Precision – вычисляет среднюю точность) перестает увеличиваться, это видно на рис. 2*а*. В итоге сеть достигла точности обнаружения ТС mAP = 0,8.

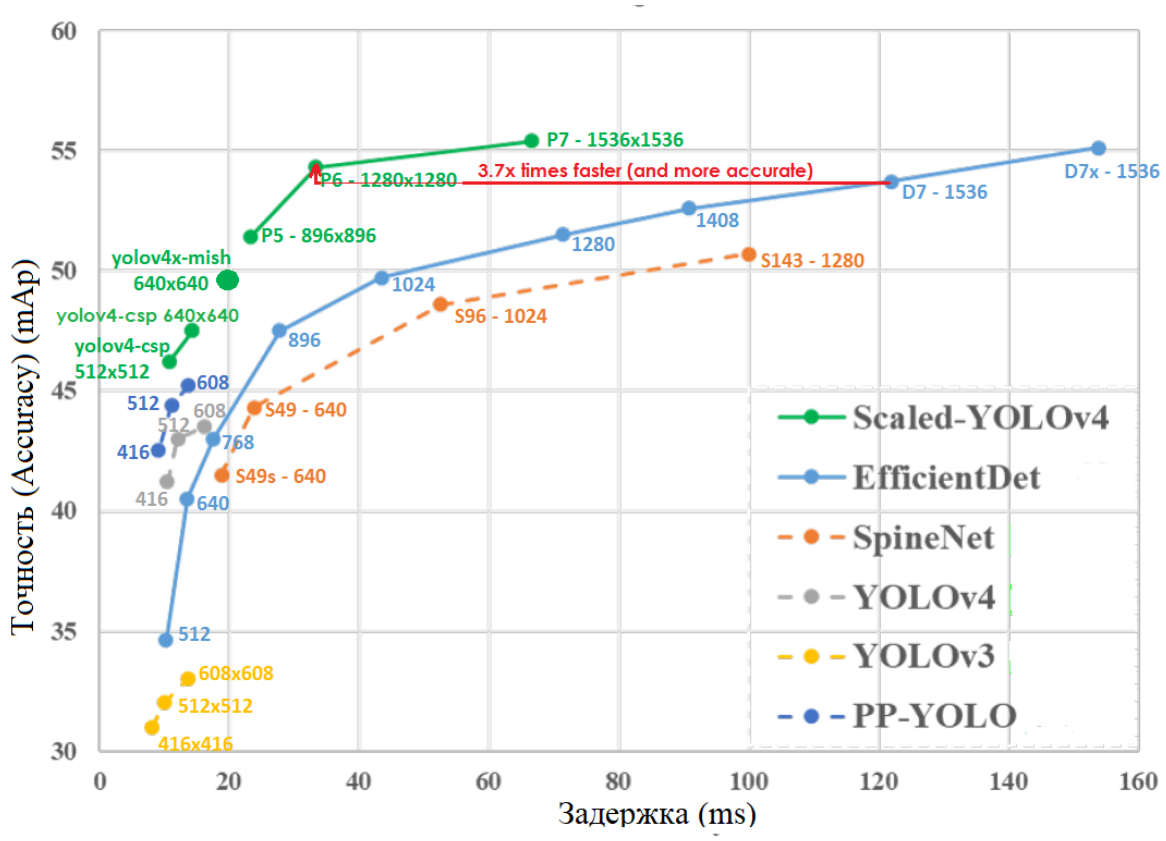
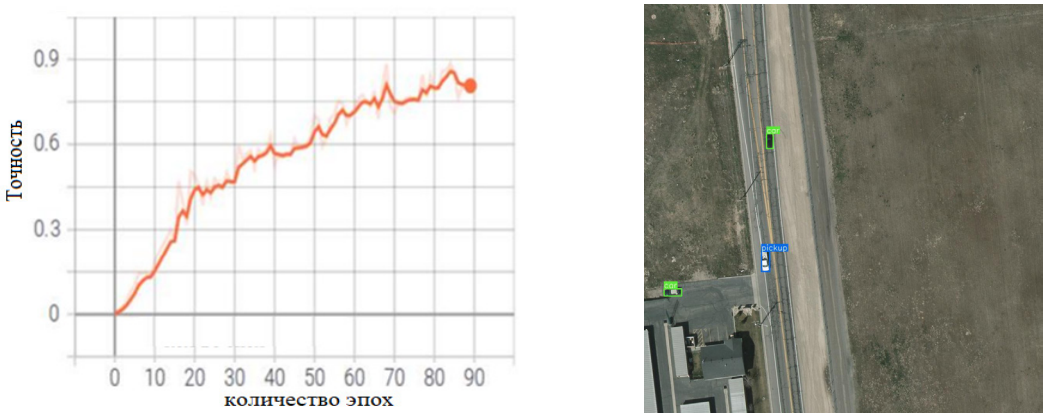



*Рис. 1. Сравнительная диаграмма точности обнаружения объектов сетью Scaled-YOLOv4 и другими наиболее популярными нейронными сетями [1]*




а) б)

*Рис. 2. Обнаружение ТС: а – график обучения детектора ТС; б – пример результатов работы детектора (показанных ограничивающими рамками и ярлычками)*

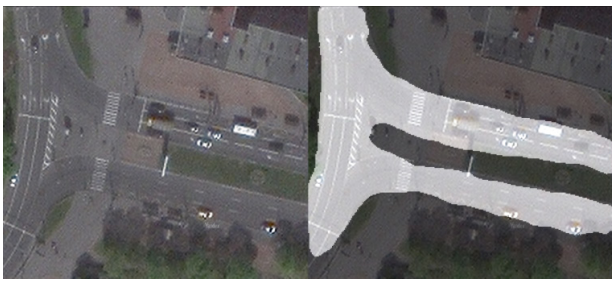
Пример результатов обнаружения показан на рис. 2*б*.

## Выделение дорог

При решении задачи выделения дорог на аэрокосмических снимках были встречены трудности, которые мешают современным средствам сегментации находить четкие границы проезжей части: загораживание ближайшими деревьями, тени от соседних зданий, разная текстура и цвет дорог, несбалансированность классов дорог (из-за относительно небольшого количества пикселей изображений, относящихся к дорогам) и т. п. Для решения задачи сегментации была выбрана архитектура сети U-net [4]. Это СНН, которая была создана в 2015 году для сегментации биомедицинских изображений и считается на сегодняшний день одной из стандартных архитектур для решения задач сегментации изображений. Для обучения данной СНН не удалось найти подходящей базы данных с размеченными изображениям дорог. Поэтому было принято решение о самостоятельном создании набора данных. Для этого использовались спутниковые изображения с сервиса Яндекс-карты [5], 80 % из которых были размечены в качестве обучающей выборки (рис. 3).

а) б)

*Рис. 3. Пример изображений набора данных для обучения СНН выделению дорог: а – исходное изображение; б – результат его разметки*



а) б)

*Рис. 4. Пример результатов выделения дороги: а – исходный снимок; б – помеченные на нем пикселы, относящиеся к дороге*

## Формирование «маски» выделенной дороги

Маска дороги получается в результате сегментации аэрокосмического снимка. Обученная нейронная сеть для каждого пиксела снимка возвращает вероятность того, что он принадлежит классу дорога. Если вероятность меньше 0.5, считается что пиксел соответствует фону, в противном случае это дорога. Пример выделения пикселов, относящихся к дороге, приведен на рис. 4. В созданной маске пикселам дороги присваивается метка 255 (белый цвет), остальным пикселам – метка 0 (черный цвет).

а) б) в)

*Рис. 5. Маркировка пикселов проезжей части и ее улучшение: а – исходное изображение; б – результат его сегментации с помощью СНН; в – расширение маски выделенной проезжей части с помощью операции дилатации*

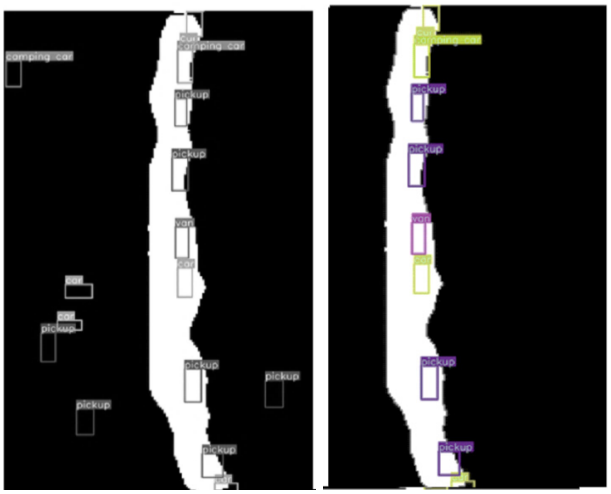
## Улучшение результатов сегментации

На рис. 4 получены достаточно хорошие результаты выделения дорог, но в целом на части изображений пикселы дорог помечаются не очень точно. Надежно выделяется только центр проезжей части, как видно на рис. 5.

Было решено улучшить результаты сегментации с помощью морфологической фильтрации, основными операторам которой являются эрозия (сужение), дилатация (расширение), открытие и закрытие. Для расширения выделенной области проезжей части дороги применена операция дилатации, как это также проиллюстрировано на рис. 5.

## Селекция обнаруженных автомобилей, находящихся на проезжей части дорог

Целевой задачей является обнаружение автомобилей, находящихся именно на проезжей части дорог. СНН обнаружения обучена находить все ТС на изображении, поэтому результаты выделения дороги применяются для аннулирования результатов обнаружения ТС, находящихся вне дороги. Для этого анализируются пикселы маски выделенной дороги, которые соответствуют обнаруженным ТС. Если меньше чем 20 % пикселов маски дороги попадают внутрь рамки (bounding box), ограничивающей обнаруженное ТС, то данное обнаружение считается недействительным, как это проиллюстрировано на рис. 6 и 7. Рис. 7, в частности, иллюстрирует селекцию частей маски дороги, которые соответствуют ограничивающим рамкам обнаруженных ТС (светло-серые области внутри ограничивающих рамок). В темно-серых ячейках показаны аннулированные результаты обнаружения ТС, в ограничивающих рамках которых количество пикселов (помеченных черным цветом), не соответствующих маске выделенной дороги, слишком велико.



а) б)

*Рис. 6. Селекция ТС, находящихся на проезжей части дороги: а – все обнаруженные ТС; б – результат селекции ТС, находящихся на проезжей части*

Итоговый результат обнаружения ТС, находящихся на проезжей части дороги, представлен на рис. 8, на котором отображены:

– название исходного изображения;

– результаты обнаружения на нем всех ТС, помеченные ограничивающими рамками и ярлычками;

– маска выделенной проезжей части;

– выбранные ТС, находящиеся на проезжей части;

– автоматически вычисленное количество обнаруженных на проезжей части ТС (показано в надписи над рисунком).

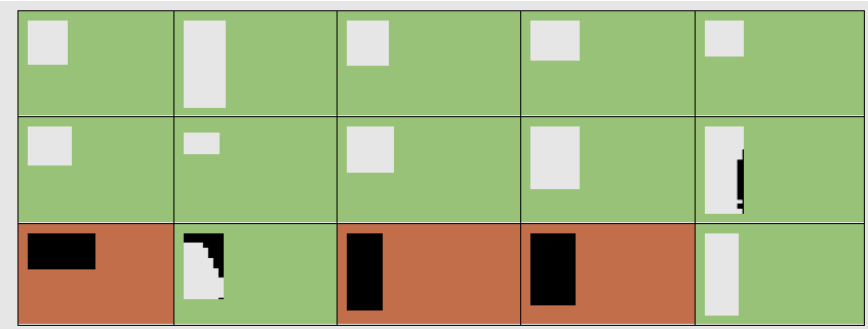


*Рис. 7. Аннулирование результатов обнаружения ТС, находящихся вне дороги*

а) б) в)

*Рис. 8. Результаты автоматического мониторинга дорожно-транспортной обстановки: а – исходный спутниковый снимок с обнаруженными ТС; б – селекция ТС, попавших в сформированную область дороги; в – ТС, обнаруженные на проезжей части дороги*

## Заключение

Разработаны и программно реализованы алгоритмы обнаружения и подсчета по аэрокосмическим снимкам ТС, находящихся на проезжей части дорог. В дальнейшем, в целях увеличения надежности обнаружения ТС и выделения проезжей части планируется расширение и совершенствование наборов обучающих данных для обнаружения автомобилей и дорог. Для улучшения выделения проезжей части планируется также применение морфологической фильтрации с ориентированными удлиненными структурирующими элементами.

### Библиографический список

1. Scaled YOLO v4 самая лучшая нейронная сеть для обнаружения объектов на датасете MS COCO. URL: https://habr.com/ru/post/531786/ (дата обращения: 12.11.2021).

2. Структура YOLOv4. URL: https://netron.app/?url=https://raw.githubusercontent.com/AlexeyAB/darknet/master/cfg/yolov4-csp.cfg (дата обращения: 13.11.2021).

3. Vehicle Detection in Aerial Imagery (VEDAI): a benchmark Sebastien Razakarivony and Frederic Jurie, 2014. URL: https://downloads.greyc.fr/vedai/ (дата обращения: 13.11.2021).

4. U-Net: нейросеть для сегментации изображений. URL: https://neurohive.io/ru/vidy-nejrosetej/u-net-image-segmentation (дата обращения: 11.11.2021).

5. Яндекс.карты. URL: https://yandex.ru/maps/118936 (дата обращения: 05.11.2021).

**УДК 004.021** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-215**

***В. Л. Оленев****
*кандидат технических наук, доцент*
***А. А. Карандашев****
*ассистент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# БЕСТУПИКОВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ С ЧЕРВЯЧНОЙ КОММУТАЦИЕЙ

*В статье обсуждается проблема блокировок в сетях с червячной маршрутизацией. Рассматриваются три концепции решения проблемы тупиков в сетях передачи данных. Первая концепция представляет собой надежный и проверенный алгоритм Up/Down Routing. Вторая концепция описывается новым универсальным алгоритмом Nue с балансировкой нагрузки. Третья концепция демонстрирует новою теорию на основе трех теорем EbDa, позволяющих строить универсальные алгоритмы беступиковой маршрутизации. Представленная классификация типов блокировок и методов их решения помогает продемонстрировать роль и значимость каждого из решений, а результирующая таблица подводит итог проведенному исследованию.*
***Ключевые слова:*** *беступиковая маршрутизация, методы, червячная коммутация, сети, алгоритмы, графы.*

***V. L. Olenev****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
***A. A. Karandashev****
*Assistant*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# DEADLOCK-FREE ROUTING IN WHORMHOLE NETWORKS

*This paper discusses the problem of blocking in wormhole networks. The concepts of solving the problem of deadlocks in data transmission networks are considered. The first concept is a robust and proven Up/Down Routing algorithm. The second concept is described by the new generic load-balanced Nue algorithm. The third concept demonstrates a new theory based on the three EbDa theorems, allowing to build universal algorithms for dedlock-free routing. The presented classification of blocking types and methods for their solution helps to demonstrate the role and significance of each of the solutions, and the resulting table summarizes the research conducted.*
***Keywords:*** *deadlock-free routing, methods, wormhole, nets, algorithms, graphs.*

Проблема построения беступиковых маршрутов для различных сетевых топологий занимает важное место в современной компьютерной технике. Прежде всего, это связано с развитием сети Интернет и микропроцессорных технологий. Хорошо известная проблема блокировок в сетях передачи данных изучается уже много лет. В результате исследований были представлены различные алгоритмы, позволяющие строить беступиковые маршруты для сетей передачи данных. В современной индустрии особое место занимают сети с червячной маршрутизацией, которые широко используются в промышленных технологиях. Они помогают маршрутизировать пакеты с данными как на микропроцессорном уровне, так и на более высоких уровнях абстракции. Однако на любом уровне обработки данных могут возникнуть ситуации, при которых пакет не достигнет своего адресата. Обычно это случается в случае блокировки пакета. Пакет может быть заблокирован по причине использования необходимых ему ресурсов сети, другими пакетами. Другими словами, главная причина всех блокировок сети – это ограниченное множество ресурсов сети.

## Проблема блокировок в сетях передачи данных

Всего можно выделить три различных типа блокировок:

Голодание (starvation)

Ливлоки (livelocks)

Тупики (deadlocks)

Ситуация голодания (starvation) наступает, когда пакет с данными останавливается окончательно и не может передаться дальше из-за интенсивного трафика. Ресурсы необходимые

для дальнейшей передачи постоянно заняты другими пакетами. Такая ситуация может возникнуть в случае неверного распределения ресурсов. Простая схема циклического перебора с распределением по требованию достаточна для обеспечения справедливого использования ресурсов. Если используется система приоритетов, необходимо зарезервировать некоторую полосу пропускания для пакетов с низким приоритетом, чтобы предотвратить голодание. Это можно сделать, ограничив количество пакетов с высоким приоритетом или зарезервировав некоторые виртуальные каналы или буферы для пакетов с низким приоритетом [1].

Ливлоки (livelocks) могут возникнуть только в том случае, когда пакеты будут передаваться по путям, которые не являются кратчайшими из возможных для данного адресата. В таком случае пакеты не блокируются окончательно, но и не могут достигнуть места назначения. Это происходит из-за того, что ресурсы необходимые для достижения адресата будут постоянно заняты другими пакетами. Решением является использование только кратчайших путей для передачи данных. Это не только решает проблему ливлоков, но и увеличивает производительность в сетях с червячной маршрутизацией, поскольку пакеты будут занимать только строго необходимые каналы для достижения места назначения. Основная причина использования не минимальных маршрутов может быть связана с требованием к отказоустойчивости сети. Даже если используются не минимальные маршруты, ливлоки можно устранить путем ограничения количества лишних хопов в маршруте. Другая причина использования не минимальных маршрутов – избегание тупиков или дедлоков. В таком случае маршрутизация скорее всего будет лишена ливлоков [1].

Тупик или дедлок (deadlock) может возникнуть, когда пакеты не могут достигнуть узлов назначения из-за того, что ресурсы необходимые для дальнейшей передачи заняты. В такой ситуации все пакеты, входящие в тупиковую конфигурацию, блокируются навсегда. Каждый пакет из списка заблокированных в тупике пакетов, запрашивает ресурсы, которые удерживаются другим пакетом из списка заблокированных в тупике пакетов. Рассмотренная ситуация и будет называться тупиком. Стоит отметить, что возможна ситуация, когда тупик возникнет при блокировке пакета в сети из-за того, что необходимый для дальнейшей передачи ресурс не используется получателем. Этот случай создается приложением и не будет рассматриваться в статье [1].

При реализации сетей передачи данных чрезвычайно важно устранять блокировки рассмотренных типов. В противном случае некоторые пакеты могут никогда не достичь места назначения. Поскольку эти ситуации возникают из-за ограниченности ресурсов, вероятность их достижения увеличивается с увеличением сетевого трафика и уменьшается с увеличением объема буферной памяти. Например, сеть, использующая червячную маршрутизацию, является одной из наиболее уязвимых для блокировок из-за принципов передачи данных в ней.

## Червячная маршрутизация

Червячная маршрутизация – это форма маршрутизации пакетов, которая использует метод коммутации «на лету». Такой метод подразумевает передачу без промежуточной буферизации пакета. В каждом пакете есть заголовок, содержащий адрес назначения. Получив такой заголовок, маршрутизатор определяет номер выходного порта для данного пакета. В случае если выходной порт свободен, то пакет тут же направляется в него, при этом не производя промежуточную буферизацию. Далее этот выходной порт помечается как занятый. Он считается таковым, до тех пор, пока не будет передан маркер конца передаваемого пакета [2].

Если же выходной порт занят, то блокируется входной порт пакета. Он будет заблокирован пока требуемый выходной порт не освободится. На рис. 1 показана передача пакета через маршрутизатор двумя терминальными узлами. На иллюстрации заголовок пакета выделен черным цветом, остальная часть пакета – серым цветом [2].

При коммутации «на лету» нет необходимости в буферной памяти в маршрутизаторах. Благодаря такому подходу увеличивается скорость передачи данных в сети сравнительно с маршрутизацией, опирающейся на коммутацию пакетов с промежуточной буферизацией. При использовании промежуточной буферизации весь пакет сначала принимается в буфер маршрутизатора, после определяется выходной канал, и только затем пакет передается дальше. Если же необходимый выходной порт занят, то прием по входному порту приостанавливается. Ожидание будет длиться пока не освободится необходимый выходной порт. Останов приема по входному порту реализуется при помощи механизма управления потоком. Приемник просто перестает посылать специальные FCT-символы управления потоком, которые разрешают посылать данные передатчику. Таким об-

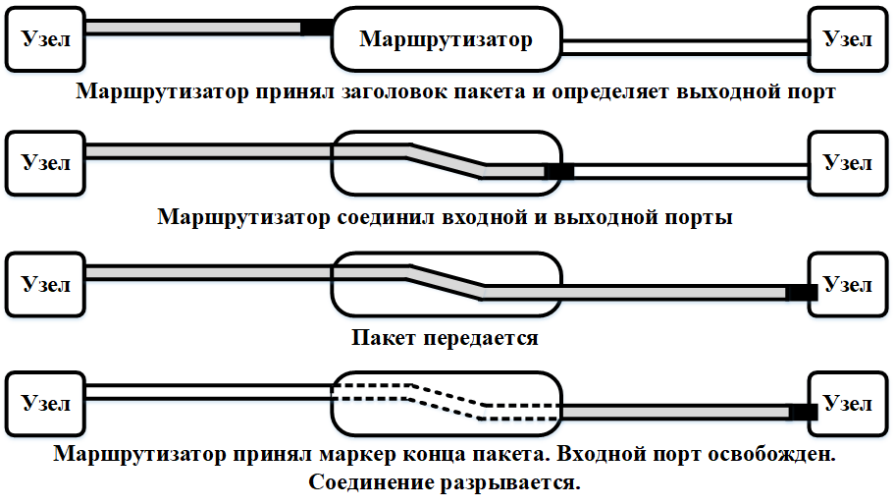



*Рис. 1. Червячная маршрутизация*

разом, происходит блокировка канала, который подсоединен к данному входу маршрутизатора. Блокировка длится до тех пор, пока маршрутизатор не закончит текущую передачу и не начнет передавать задержанный пакет [2].

## Стратегии по борьбе с тупиками при червячной маршрутизации

Тупик безусловно является самой сложной проблемой блокировки пакетов. Существует три основных стратегии борьбы с тупиками [3]:

Стратегия предотвращения тупиковых ситуаций. Предполагает использование ресурсов таким образом, чтобы никогда не возникало тупика. Этого можно достичь, зарезервировав необходимые для передачи пакета ресурсы заранее перед отправкой пакета. Однако данный метод считается устаревшим [1].

Стратегия избегания тупиковых ситуаций позволяет предотвратить тупики при построении маршрута. Ресурсы предоставляются пакету только тогда, когда он передается по сети и, если это не приводит к взаимоблокировкам. Алгоритмы, относящиеся к этому классу, позволяют сформировать беступиковые маршруты в сети. Но такой подход сильно ограничивает проектировщика в прокладке маршрутов [1].

Стратегия восстановления позволяет восстанавливать передачу пакетов в случае возникновении тупиковой ситуации. Ресурсы предоставляются пакетам без предварительной проверки, однако при обнаружении взаимоблокировок ресурсы назначаются другим пакетам. Такие стратегии применимы если взаимоблокировки редки и можно допустить возникновение тупика. Алгоритмы относящиеся к этому классу позволяют обнаруживать тупики и освобождать задействованные в нем ресурсы, назначая их другим пакетам. Благодаря такому подходу проектировщик не ограничен в возможностях построения маршрутов. Однако требуются ресурсы и технологии, которые могут быть применены не во всех сетях [1].

## Существующие алгоритмы и методы

За прошедшие годы проблема построения беступиковых маршрутов широко обсуждалась. Было создано множество алгоритмов и методов, а также общих теорий, позволяющих строить беступиковые маршруты для различных типов сетей. Так, например, уже в 1993 году Хосе Дуато представил новую теорию для беступиковой маршрутизации в сетях с червячной коммутацией. В своей статье автор не только представил теоремы составляющие теоретические основы разработки алгоритмов адаптивной беступиковой маршрутизации, но и разработал и проверил на практике две методологии, позволяющие проектировать отказоустойчивые алгоритмы беступиковой маршрутизации [4]. В 1995–1996 годах Хосе Дуато и Лорен Швиберт в своих статьях определили необходимые и достаточные условия для маршрутизации в сетях с червячной коммутацией [5], [6]. Однако за прошедшие годы исследования шагнули далеко вперед.

*Алгоритм Up/Down Routing*

В 2000 году Дж. К. Санчо и Х. Дуато представили новую методологию построения беступиковых таблиц маршрутизации. Разработан-

ный алгоритм получил название Up/Down Routing [7]. Спустя четыре года, авторы представили уточнение алгоритма в своей новой статье [8].

Up/Down routing – это алгоритм беступиковой маршрутизации для регулярных и нерегулярных топологий. Классический алгоритм создает связующее дерево для заданной сети с помощью алгоритма BFS [7]. В рассматриваемом случае связующее дерево строится с использованием алгоритма обхода в глубину (Depth-First Search, DFS) [8]. Он обеспечивает более высокую адаптивность (меньшие ограничения маршрутизации) и лучший баланс трафика (меньшее количество пересекающихся маршрутов) для построения маршрутов.

Для решения задачи беступиковой маршрутизации применяется метод, основанный на построении ациклического графа топологии сети. Построение графа начинается с построения дерева, в котором задается ориентация ребрам графа топологии сети. Дерево строиться в глубину, начиная с корневой вершины.

Граф формируется в соответствии с правилами [9]:

– все узлы и коммутаторы должны быть поставлены в соответствие отдельным вершинам в графе.

– все каналы должны быть поставлены в соответствие ребрам графа.

Чтобы избежать тупиков, все еще позволяя всем связям использоваться применяется правило up/down: правильный маршрут должен сначала пересечь нуль или более каналов в направлении вверх, а затем нуль или более каналов в направлении вниз. Таким образом, канальные зависимости избегаются так как пакет не может пересечь канал в направлении вверх поле пересечения канала в направлении вниз.

Таблицы маршрутизации при этом создаются в соответствии с правилом up/down. Данный метод решения задачи беступиковой передачи данных позволяет учесть червячную маршрутизацию.

Чтобы перейти к поиску маршрутов, необходимо из полученного ориентированного графа топологии построить каналозависимый граф (CDG). Каналозависимый граф отображает зависимость каналов, занимаемых пакетами при передаче данных в сети. Использование каналозависимого графа – переход от сложной логики up/down маршрутизации к простому представлению использования каналов для передачи. Другими словами, в каналозависимом графе можно осуществлять переход между вершинами только в прямом направлении дуг, что значительно упрощает понимание механизма маршрутизации.

Каналозависимый граф содержит в себе вершины, представляющие физические каналы сети, и дуги, определяющие возможную последовательность использования этих каналов.

Для построения каналозависимого графа необходимо дополнить полученный ациклический граф топологии сети обратными дугами, чтобы учитывать возможность передачи данных в прямом и обратном направлениях. Исходные дуги помечаются как основные. Таким образом, получается дополненный граф с помеченными дугами. Далее для каждой дуги создаются вершины каналозависимого графа. Если в дополненном графе между помеченными дугами возможна передача по правилам up/down маршрутизации, значит, дуга добавляется в ка-

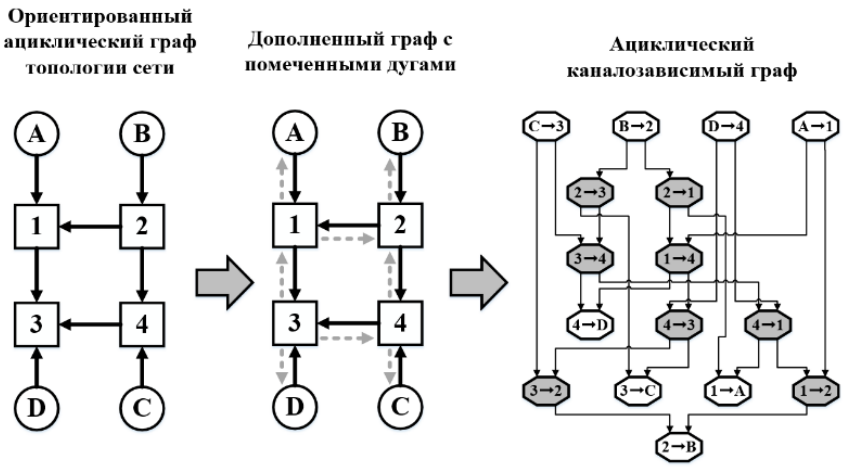



*Рис. 2. Получение каналозависимого графа*

налозависимый граф между соответствующими вершинами. Получение каналозависимого графа представлено на рис. 2.

После построения каналозависимого графа, необходимо построить маршруты между заданной парой вершин. Для этого производится разметка вершин графа, из которых можно достигнуть приемника из заданной пары вершин построения маршрута. Разметка производится обходом в ширину от приемника только по обратным дугам.

Как только каналозависимый граф размечен, производится поиск маршрутов между заданной парой вершин. Поиск происходит в глубину от вершины источника до вершины приемника. В качестве следующей вершины, записываемой в маршрут, выбирается та, которая помечена как достижимая до приемника. Если таких вершин несколько – выбирается такая вершина, которая имеет кратчайшее расстояние до приемника. Выход из рекурсии говорит о том, что построен очередной маршрут.

Всего будет искаться k + 1 маршрутов, где k – количество альтернативных маршрутов, заданное пользователем. Таким образом, алгоритм находит необходимое количество беступиковых маршрутов с кратчайшим расстоянием или близким к кратчайшему.

*Алгоритм Nue*

В связи с отказами оборудования или исходной высокой сложностью сетевой топологии существующие методы маршрутизации, основанные на конкретных сетевых топологиях, становятся все более неактуальными. А существующие методы маршрутизации, не зависящие от топологии, либо страдают от плохой балансировки нагрузки, либо не имеют ограничений по количеству виртуальных каналов, необходимых для разрешения тупиковых ситуаций в таблицах маршрутизации. В такой ситуации в 2016 году Йенс Домке вместе с соавторами в своей статье предложили новый подход для построения беступиковых высокопроизводительных маршрутов. Авторы предлагают реализацию модели Nue, эвристически оптимизируя балансировку нагрузки при беступиковой маршрутизации и не превышая заданное количество виртуальных каналов. Алгоритм Nue, имеющий низкую временную сложность, представлен как подходящий для маршрутизации при современных высокопроизводительных вычислениях [10].

Основная идея заключается в построении полного каналозависимого графа (Complete Channel Dependency Graph) или CCDG графа. Основываясь на таком графе алгоритм Nue

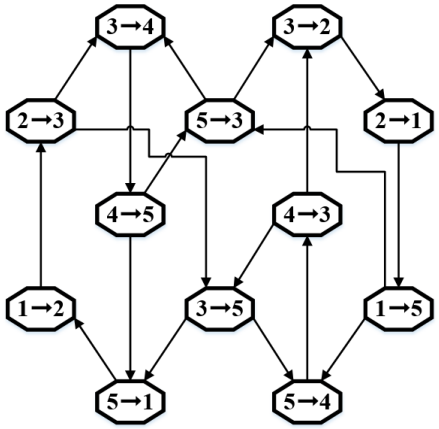



*Рис. 3. Пример CCDG графа*

строит беступиковые маршруты. Чтобы проложить пути при помощи CDG графа, необходимо полное представление всех возможных зависимостей каналов. В связи с этим необходимо определить CCDG граф, используя смежность каналов. Пример такого графа представлен на рис. 3.

Для избегания тупиковых ситуаций алгоритмы адаптивной беступиковой маршрутизации обычно используют набор буферов или отдельный виртуальный уровень, как в алгоритме Up/Down Routing. В случае блокировки пакета, коммутаторы передают данные на оставшейся альтернативный выходной порт, согласно созданной таблице маршрутизации. Похожая концепция адаптирована к алгоритму Nue. Использование остовного дерева помогает минимизировать количество каналов, необходимых для соединения всех узлов и не вызывает циклических зависимостей. Использование подхода с альтернативными маршрутами в случае блокировки пакета в алгоритме Nue несет за собой две функции:

– определение начального набора зависимостей каналов, которые после добавления не могут быть удалены для разрешения циклов в CCDG графе;

– альтернативные маршруты должны активно использоваться алгоритмом Nue после обнаружения неразрешенной тупиковой ситуации для узла назначения.

Благодаря этапу, на котором используются остовные деревья, алгоритм Nue обеспечивает построение кратчайших путей, что позволяет уменьшить задержку при передаче пакета с данными и избежать избыточной нагрузки на отдельные каналы.

Для балансировки нагрузки маршрутов используется модифицированный алгоритм

Дейкстры, использующий кучу Фибоначчи для снижения временной сложности и расширенный для работы с мультиграфами [11]. После вычисления всех возможных маршрутов к заданному узлу назначения, балансировка реализуется при помощи обновления положительных весов графа для используемых каналов между парами источников и приемников. Также авторы статьи предоставляют реализацию функции маршрутизации Nue и предлагают несколько способов ее оптимизации.

*Теоремы EbDa*

В течение трех последних десятилетий использовалась теория Далли доказывающая, что маршруты беступиковые, если в каналозависимом графе нет циклов. Первоначально эта теория была предложена для детерминированной маршрутизации, а затем была расширена до адаптивной маршрутизации с помощью концепции сменных моделей. В 2017 году авторы Масума Эбрахими и Масуд Данешталаб в своей статье предложили три теоремы (теоремы EbDa), которые позволяют построить ациклический каналозависимый граф. Представленный в статье подход позволяет учитывать возможные изменения прямо в графе и отойти от концепции сменных моделей под конкретные задачи [12].

Предложенная методика предлагает разделять каналы на категории, чтобы получить схемы с максимальной адаптивностью для любого количества каналов и размеров сети. Вместо того, чтобы предлагать новый алгоритм маршрутизации, авторы попытались создать основу для разработки алгоритмов беступиковой маршрутизации с разной степенью адаптивности для сетей с червячной коммутацией. Авторы представляют новую теорию как обобщенную основу для проектирования ациклических графов не только межсетевого взаимодействия, но и для любых других моделей, где используется схожий математический аппарат.

## Сравнение

В результате проведенного исследования были рассмотрены три подхода к построению беступиковых маршрутов для сетей с червячной коммутацией. Каждая из рассмотренных подходов соответствует концепции избегания тупиковых ситуаций.

Рассмотренный в статье алгоритм Up/Down Routing представляет собой законченную, целостную, модифицированную версию алгоритма 2000 года. Подход является основополагающим для целого семейства алгоритмов: UD DFS routing, L-turn routing, segment-based routing (SR) [7], [13], [14]. Несмотря на свою простоту и широкую востребованность, алгоритм является достаточно требовательным по времени. Благодаря использованию такого подхода можно заранее создать таблицы беступиковой маршрутизации для каждого коммутатора. Однако в случае изменения структуры сети, могут возникнуть блокировки пакетов. Базовая версия не предусматривает адаптивной маршрутизации и изменения структуры сети, что является безусловным минусом.

Алгоритм Nue, предложенный в 2016 году, является новым подходом к построению беступиковых маршрутов в сетях с червячной коммутацией. Он разработан специально для современных высокопроизводительных вычислений и позволяет обеспечивать балансировку нагрузки при беступиковой маршрутизации. Поддержка технологии виртуальных каналов и низкая временная сложность являются безусловными достоинствами данного алгоритма. Кроме того, построение адаптивных маршрутов позволяет не зависеть от топологии сети. Данный алгоритм представляет не только универсальный подход, но и широкие возможности по оптимизации функции маршрутизации.

Концепция EbDa, представленная в 2017 году не представляет собой завершенный алгоритм. Это общая теория, основанная на трех теоремах и идее разделения каналов на различные типы. Основываясь на предлагаемой базе, можно разрабатывать универсальные алгоритмы беступиковой маршрутизации не только для сетей передачи данных, но и для любых структур, представляемых в виде графа.

Каждый из рассмотренных подходов следует оценить по восьми критериям:

– подход представляет собой завершенный алгоритм;

– подход представляет собой надежный и проверенный алгоритм;

– поддерживается изменение сетевой структуры;

– на выполнение алгоритма затрачивается небольшое количество времени;

– поддерживается червячная маршрутизация;

– поддерживается адаптивность;

– поддерживается технология виртуальных каналов;

– простая реализация.

Результат проведенного анализа, представлен в табл. 1.

Как видно из представленной таблицы, каждый подход имеет свои достоинства и недостатки.

*Таблица 1*

**Результат анализа рассмотренных подходов**

| Подход/ Критерий | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Up/Down Routing | + + | | – | – | + | – | + | + |
| Nue | + | – | + | + | + | + | + | – |
| EbDa | – | – | + | – | + | + | + | – |

Ни один их них полностью не удовлетворяет всем заявленным критериям. Следует рассмотреть другие варианты построения беступиковых маршрутов в сетях с червячной коммутацией, а также сравнить их с уже заявленными методами.

## Вывод

В результате проведенной работы была рассмотрена проблема блокировок в сетях передачи данных. Были определены три типа блокировок:

Голодание (starvation)

Ливлоки (livelocks)

Тупики (deadlocks)

Для каждого из типов были даны описание и краткая концепция решения. Кроме того, был описан принцип червячной коммутации при котором могут возникать заявленные типы блокировок. Проблема блокировки типа «тупик» была рассмотрена подробнее. В качестве разрешения данного типа проблемы были представлены три стратегии:

предотвращения тупиковых ситуаций;

избегания тупиковых ситуаций;

восстановления в случае возникновении тупиковой ситуации.

В рамках стратегии избегания тупиков были представлены три современных подхода. Первый представляет собой надежный и проверенный алгоритм Up/Down Routing. Второй – новый универсальный алгоритм Nue. Третий заявлен как обобщенная теория для создания универсальных алгоритмов решения задачи беступиковой маршрутизации. В результате их сравнения по восьми заявленным критериям была представлена результирующая таблица.

Для дальнейшей работы предлагается более глубокое изучение направления построения беступиковых адаптивных маршрутов для сетей с червячной коммутацией. Представляется перспективным направление по разработке алгоритмов, позволяющих избегать всех типов блокировок для сетей с червячной коммутацией. Также стоит детальнее рассмотреть представленные алгоритмы и сравнить их с другими существующими новинками.

## Библиографический список

1. *Duato J., Yalamanchili S., Ni L.* Interconnections: an engineering approach / IEEE. 2003.

2. *Волков П. Л., Горбачев С. В.* Исследование DS-линков и алгоритмов маршрутизации в сети SpaceWire. Методические указания к выполнению лабораторных работ. СПб.: ГУАП, 2003. С. 43.

3. *Singhal M.* Deadlock detection in distributed systems / IEEE. 1989. Vol. 22. N 11. P. 37–48.

4. *Duato J.* A New Theory of Deadlock Routing in Worm-Switched Networks / IEEE. 1993. P. 1320–1331.

5. *Duato J.* Necessary and Sufficient Condition for Deadlock Adaptive Routing in Worm-Switched Networks // International Conference on Parallel Processing. 1994. Vol. 1. 1994. P. 142–149.

6. *Schwiebert L.,* D. Jayasimha. Necessary and sufficient condition for dead-end worm routing // Parallel distributed computing. 1996. P. 103–117.

7. *Sancho J., Robles A., Duato J.* New Methodology for Calculating Deadlock Routing Tables for Non-Regular Networks // International Seminar on Communications, Architecture and Applications for Networked Parallel Computing. 2000. P. 45–60.

8. *Carlos J., Robles A., Duato J.* Efficient algorithm performance improvement methodology up*/down* routing / IEEE. 2004. P. 740–754.

9. *Курбанов Л., Рождественская К., Суворова Е.* Беступиковая маршрутизация в бортовых сетях SpaceWire // Двадцать вторая Конференция Ассоциации открытых инноваций (FRUCT). 2018. С. 107–114.

10. *Domke J., Hoefler T., Matsuoka S.* Dependency Graph Routing: A New Approach to High-Performance Deadlock Routing // Proceedings of the 25th ACM International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing. 2016. P. 12.

11. *Dijkstra W.* A note on two problems related to graphs // Numerische Mathematik 1. 1959. P. 269–271.

12. *Masoumeh E., Daneshtalab M.* EbDa: new theory of designing and testing networks of inter-network dead-end interaction / IEEE. 2017. P. 703–715.

13. *Koibuchi M., Funahashi A., Jouraku A.* L-turn routing: adaptive routing in irregular networks // International Conference on Parallel Processing. 2001. P. 383–392.

14. Segment-based routing: efficient fault-tolerant routing algorithm for meshes and tori / A. Mejia, J. Flich, J. Duato, S. Reinemo // 20th International Symposium on Parallel and Distributed Processing (IPDPS). 2006. P. 10.

**УДК 65.011.56** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-222**

***А. А. Петров, Н. Н. Эпаев, П. В. Шпигун****
*студенты*
***А. Ю. Сыщиков****
*старший преподаватель*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПРОТЯЖЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АВТОНОМНЫМИ ДРОНАМИ

*Одна из самых значимых инфраструктур в современном мире – это ЛЭП (Линия электропередачи) и газопровод, так как через них поставляется энергия в другие виды инфраструктур. Данная статья описывает систему для мониторинга протяженной инфраструктуры энергопередачи, с целью раннего обнаружения и предотвращения аварийных ситуаций с помощью сети автономных дронов.*
***Ключевые слова:*** *автоматизация, системы мониторинга, автопилот, квадрокоптер, БПЛА.*

***A. A. Petrov, N. N. Epaev, P. V. Shpigun****
*Students*
***A. Y. Syshchikov****
*Senior Lecturer*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# SYSTEM OF MONITORING FOR A LARGE INFRASTRUCTURE BY AUTONOMOUS DRONES

*One of the most important infrastructures in the world today is the power line and the gas pipeline, as they supply energy to other types of infrastructure. The article describes a system for monitoring large infrastructure lines using autonomous drones for early detection and preventing emergencies.*
***Keywords:*** *automation, monitoring systems, autopilot, quadrocopter, UAV.*

## Введение

Человечество неуклонно распространяет свои блага по обширным территориям континентов и материков. И линии инфраструктур, такие как ЛЭП и газопровод являются лакмусовой бумажкой прихода развитых технологий. Именно благодаря им люди даже в самых отдаленных районах могут наслаждаться теплом и уютом в собственных домах.

Однако эти линии не так монолитны и неприступны, как многим бы того хотелось. Периодически на них происходят различные аварии и происшествия, вызванные разнообразными факторами. Подробная статистика по происшествиям на линиях инфраструктур представлена на рис. 1 [1], [2]. Иногда подобные ситуации приобретают катастрофический масштаб, лишая людей благ прогресса и насильно возвращая к более древним способам обеспечения комфорта. Именно с такими проблемами сталкиваются соответствующие организации, ставя перед собой задачу как можно скорее устранить неполадку, а в идеале предотвратить аварию на ранних этапах.

Исходя из наличия такого большого спектра проблем и большой протяженности линий инфраструктур просто визуальный осмотр этих линий достаточно трудоемок и затратен, даже если осмотр ведут несколько групп людей. Однако благодаря активному развитию технологий, мы имеем возможность использовать дроны как агенты для мониторинга линий инфраструктур.

Существует несколько подходов к управлению дронами:

– стационарное управление – дрон управляется автономно с док-станции, используя сложную систему управления, основанную на показателях множества датчиков и камер, с использованием компьютерного зрения и ИИ (искусственного интеллекта);

– автономное управление – полетная миссия с определенными координатами загружается в дрон, и он сам облетает их, ориентируясь по GPS (Global Positioning System – система глобального позиционирования);

*Рис. 1. Статистика происшествий на ЛЭП и газопроводе*

– ручное управление – оператор дрона сам управляет им ориентируясь на наружное наблюдение или видео информацию, передающуюся с дрона.

Существующие вариации использования дронов разнообразны, каждый имеет как положительные, так и негативные стороны. Однако они все сходятся в одном – в освобождении человека от излишнего труда, а также обеспечения скорости и эффективности выполнения работы. Мониторинг с помощью дронов снижает затраты на обслуживание линий инфраструктуры за счет лучшей системы поиска аварий и отправки данных о месте аварии и о ее причине ремонтной бригаде.

## Обзор имеющихся решений

После появления многочисленных ЛЭП и газопроводов удаленный мониторинг линий инфраструктур стало вопросом времени, и на данный момент рынок предлагает ряд перспективных решений, которые предлагают решение данной проблемы.

Первое решение представлено на рис. 2, HIVE – полностью автоматизированная станция с дроном, для регулярного мониторинга объекта [3]. Данная система ведет обследование инфраструктуры ЛЭП с помощью лазерного сканирования и смотрит за состоянием целостности проводов. Также дроны занимаются мониторингом окружающей территории и нависающих деревьев.

Достоинства данного решения заключаются в наличии у дрона интегрированной метеостанции, что позволяет заканчивать полетную миссию при неблагоприятных погодных условиях, двух внешних камер, способных снимать в двух направлениях и при этом сохраняя хорошее качество картинки, датчика обнаружения препятствий для избежания столкновения, 6 слотов для зарядки аккумулятора и умной зарядкой станции. Дрон способен работать при температурном диапазоне от -30 до 40 ° С, имеет максимальную нагрузку до 2,7 кг, и длительность полета дрона составляет целых 55 мин. Кроме того, дроном можно управляться вручную из Центра управления полетом для корректировки траектории.

*Рис. 2. HIVE – автономный дронопорт*

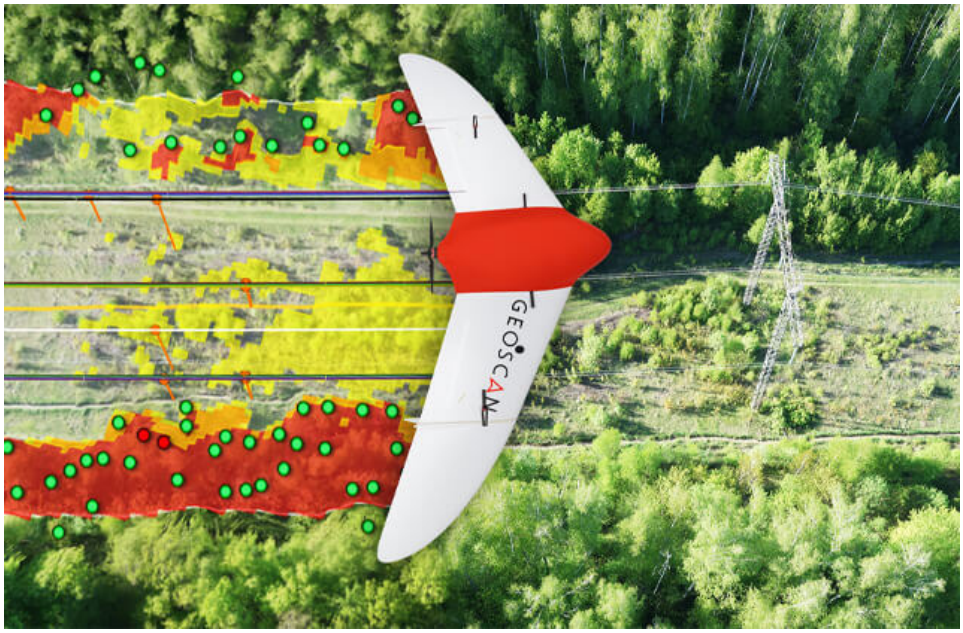



*Рис. 3. ГК Геоскан 201 – комплекс для аэрофотосъемки обширных территорий и линейно-протяженных объектов*

Несмотря на достоинство, недостаток такого решения заключается в огромном весе и размере, док-станция вместе с дроном весит 1600 кг, без специальной техники станцию не получиться транспортировать.

Второе рассматриваемое решение дроны DJI M300 RTK. Они используются для мониторинга целого нефтехимического комплекса на территории США – Shell Deer Park [4]. Инциденты на подобных предприятиях довольно редки, но все равно существуют риски для сотрудников комплекса. Чтобы избежать травм и летальных исходов при обследовании комплекса на наличие проблем, все чаще прибегают к использованию беспилотников.

Достоинства данного решения заключается в позиционировании и обнаружении объекта в 6 направлениях, что гораздо выше, чем у дрона HIVE, бортовой ИИ распознает объект так, что он будет всегда оставаться в кадре, тем самым упрощая работу оператора. Также дрон способен работать в температурном диапазоне от –20 до 50 °С, имеет максимальную нагрузку до 2,7 кг.

Недостатки этого решения заключаются в том, что для проведения работ необходим постоянный контроль со стороны оператора. Реальное время полета может варьироваться в зависимости от погодных условий и полезной нагрузки, а передача изображений в реальном времени очень проблематична. Из-за программных ограничений, малой ремонтопригодности и запрета использовать рабочую частоту 5,8 ГГц в России [5], не дает полностью раскрыться данному решению на российском рынке.

И последние решение имеющиеся на рынке представлено на рис. 3. Это ГК Геоскан 201 от отечественного производителя – это комплекс для аэрофотосъемки обширных территорий и линейно-протяженных объектов [6]. За один полет способен отснять большую территорию и обеспечивают больший радиус действия.

Достоинства данного решения заключаются в том, что заданное перекрытие выдерживается в любых условиях благодаря учету направления ветра и точному измерению пройденного пути, а автоматические построение маршрута, учет рельефа при планировании полетного задания, проверка систем перед запуском и полет после старта и аварийный режим работы при обледенении говорит о его надежности. Также стоит отметить исключительную по сравнению с другими аналогами длительность полета – 3 часа.

Изъяны этого решения заключаются в недопустимости полета при высокой скорости ветра из-за угрозы смены траектории полета, маленькой массе полезной нагрузки, и взлет осуществляется с пусковой установки, а не с земли или док-станции, что сказывается на удобстве пользования, в частности, для эксплуатации этого решения, необходим очищенный от препятствий участок для взлета и набора высоты.

Представленные решения вполне актуальны и обладают большим спросом, однако они имеют ряд недостатков, которые делают дан-

ные решения узкоспециализированными. Поэтому использование их в рассматриваемой в данной статье области применения дронов, сопряжено с некоторыми техническими вызовами, которые необходимо решить.

## Имеющиеся проблемы

Процесс реализации и эксплуатации подобных систем, приводит нас к формулировке ряда сопутствующих проблем:

– обеспечение надежности системы – автономная работа дронов достаточно непредсказуема и нуждается в дополнительных мерах безопасности;

– поддержание дронов в рабочем состоянии – дронам, как и всем сложным движущимся агрегатам, свойственен износ – например поломка дрона или деградация лопастей или батареи;

– юридическое оформление – законодательство в сфере использования БПЛА налагает множество требовании к оформлению полетов и регистрации;

– передача информации – в местах предполагаемого использования может не находиться доступных широкополосных каналов связи, необходимых для передачи большого объема видеоинформации;

– борьба с погодными условиями – неблагоприятные погодные условия не только влияют на возможность полета, но также могут привести к поломке недостаточно защищенного оборудования;

– влияние внешней фауны и человека – необходимы меры защиты комплекса от внешних негативных воздействий животных и человека.

## Пути решения проблем

Сформулируем возможные решения имеющихся трудностей:

– внедрение в состав дрона специальной платы для корректировки курса в полете, маневров уклонения и стабилизации, а также с возможностью приостановить миссию и вернуться на ближайшую станцию при возникновении неблагоприятных условий;

– разработка системы автоматической замены наиболее подверженных деградации деталей таких как лопасти и батареи. Возможная доработка дрона с использованием модульной конструкции, что позволит иметь на каждой станции некий запас модулей для быстрого ремонта дрона при износе отдельных элементов. Внедрение режима работы с циклическим перелетом между станциями одной ветви сети для обновления парка дронов. Также следует разработать достоверный протокол подобного перелета, что потребует добавить дополнительное посадочное место для дрона на док станции;

– следует детально ознакомиться с юридической стороной вопроса: организовать достаточно быструю и массовую схему регистрации БПЛА в рамках законодательства, а также проработать унификацию документов для правильного оформления полетов и предъявления этих документов компетентным органам;

– применение нескольких взаимозаменяемых способов передачи информации (LTE – Long-Term Evolution, VSAT – Very Small Aperture Terminal, Ethernet), создание собственных систем проводного и беспроводного соединение между станциями, а также резервных каналов связи (передачи информации, с помощью радиоволн), что увеличивает надежность системы и возможности по ее использованию. Реализации двух вариантов сбора данных: без обработки и с обработкой на станции, что позволит получить вариативность в регулировании нагрузки на системы связи;

– внедрение распределенной метеорологической системы, которая будет сообщать сети о прогнозе о погодных условиях на конкретных участках, что позволит станциям принимать решения о возможности полетной миссии. Добавление на станции системы контроля и регулирования температуры, для сохранности дрона при экстремальных погодных условиях, а также использование различных модификации дронов, для разных климатических зон;

– ограждение месторасположение станции забором. Применение на станции и коптере систем отпугивания птиц. Проектирование станции в виде башни, что позволит упростить взлет дрона, и усложнит доступ к движущимся частям станции.

## Требования к коптеру

Для обеспечения достаточного решения поставленной задачи к квадрокоптеру необходимо предъявить ряд требований.

Одним из основных требований к квадрокоптеру является максимальная дальность полета. Так как протяженность линий инфраструктур может быть большой, то для ее мониторинга оптимально поставить несколько докстанций с дронами с дальностью полета от 25 до 50 км.

Также дрон должен иметь грузоподъемность 2–3 кг для установки дополнительного оборудования помимо камеры, такое, как динамики для от-

пугивания птиц, и другие системы необходимые, для безопасного выполнения полетной миссии.

Ввиду того, что климат России разнообразный, температурный диапазон для нормальной работы должен быть способность работать при -20 до 40 °С. Вдобавок, следует учесть аварийный режим работы при обледенении коптера.

Квадрокоптер должен быть оснащен камерой и тепловизором, которые необходимы для сбора данных об объекте мониторинга, а также платой, которая будет контролировать камеру и тепловизор, собирая полученные данные.

Помимо возможности строгого следования по заранее загруженной миссии на пути дрона могут встречаться препятствия, затрудняющие дальнейшее перемещение. Для разрешения подобной ситуации квадрокоптер должен быть оснащен системой, позволяющей однозначно идентифицировать препятствия, обеспечивать их безопасное преодоление путем облета по оптимальной траектории и дальнейшего продолжения полетной миссии.

## Требования к док-станции

Для обеспечения достаточной надежности самой станции, а также поддержания работоспособности самого квадрокоптера к док-станции также необходимо предъявить ряд требований.

Так как данный проект стремится к обеспечению мобильности комплекса, к станции предъявляется требование по максимальной массе в диапазоне от 50 до 70 кг. Данный весовой диапазон позволяет с достаточной скоростью перемещать весь комплекс без применения крупногабаритной техники.

Ввиду того, что комплекс может располагаться в зонах с различными природными и погодными условиями, станция обязана обеспечивать сохранность собственного оборудования и оборудования квадрокоптера. Одним из наиболее опасных факторов как для оборудования станции, так и для квадрокоптера является температурный режим в зоне расположения комплекса. Следовательно, необходимо обеспечить устойчивость станции к температурному диапазону от -40 до 50 °С. Увеличенный диапазон относительно квадрокоптера вызван тем, что помимо сохранности оборудования самой станции требуется обеспечить сохранность и самого квадрокоптера, располагающегося внутри. Также для обеспечения поддержания дронов в рабочем состоянии, станция обязана иметь возможность размещения как минимум двух дронов в соответствующих отсеках.

Так как анализ собранной информации происходит не на самой станции, а через осуществляющего просмотр оператора, тот требуется обеспечить качественное соединение как минимум на время передачи видеофайла. Для этого на самой станции необходимо разместить коммуникационный модуль с поддержкой LTE и GPS, а также с возможностью расширения наземной спутниковой станцией в отдаленных районах и резервным радио модулем.

Помимо простого обеспечения передачи видеофайла оператору, станция обязана поддерживать работоспособность самого квадрокоптера. Элементами, требующими наибольшего внимания, являются лопасти и аккумулятор, так как они подвержены наибольшему воздействию в процессе функционирования квадрокоптера. Исходя из этого, станция должна обладать средствами и механизмами, способными обеспечивать замену изношенных лопастей, а также осуществлять подзарядку или полную замену аккумуляторов.

Однако не только аккумуляторы и лопасти нуждаются в регулярных проверках. Сами системы квадрокоптера также могут отказать или содержать ошибки. Как следствие, станция должна содержать модуль, ответственный за калибровку оборудования квадрокоптера и его тестирование на наличие ошибок и сигнализировать при их нахождении. Таким образом, появляется возможность предотвратить запуск дрона, содержащего внутреннюю неисправность и обеспечить сохранность техники до прибытия специалистов.

Помимо природных факторов, влияющих на работоспособность комплекса, могут присутствовать и другие потенциальные угрозы, такие как дикие животные, а также люди. Животные могут воспринимать курсирующий по маршруту дрон как враждебный объект. В таком случае будет крайне трудно избежать повреждений аппаратуры. Помимо диких животных, негативное влияние на комплекс могут оказывать мародеры и различные маргинальные личности, заинтересованные в разрушении станции и квадрокоптера. На основе данных фактов можно сделать вывод о том, что станция должна обеспечивать отпугивание диких животных, а также иметь либо собственную, либо искусственно возведенную внешнюю защиту от посягательств мародеров.

Выполнение всех перечисленных выше требований способно обеспечить непрерывную, надежную и автономную работу комплекса в долгосрочной перспективе, с возможностью определения и локализации возникающих

ошибок в работе каждого из элементов комплекса с последующей сигнализацией оператору о возникшем происшествии.

## Предполагаемое устройство узла системы

Глобально представленный комплекс состоит из трех элементов: квадрокоптера, станции и оператора. Каждый из них представляет собой ключевой элемент системы, без которого функционирование комплекса не представляется возможным.

Рассмотрим подробнее каждый из представленных элементов, а также их взаимодействие между собой:

***Квадрокоптер***

Осуществляет облет по автоматически созданному маршруту или заданной миссии, фиксируя состояние линий инфраструктуры. После завершения собственной миссии и возвращения на станцию квадрокоптер придает зафиксированный материал о состоянии линий инфраструктур на станцию для дальнейшей обработки и передачи. Является несущим объектом для остальных составных частей, а также используется для непосредственного облета линий инфраструктур. Также квадрокоптер способен корректировать собственное положение, осуществляя облет препятствий, возникающих на пути маршрута. Данная особенность позволяет не беспокоиться о тонкой настройке маршрута, о непредвиденном возникновении препятствий на пути следования. Помимо возможности следования миссии и облета препятствий, квадрокоптер способен при необходимости отпугивать животных, представляющих для него потенциальную угрозу.

***Станция***

Является ключевым элементом в обслуживании и поддержании работоспособности всего комплекса. Она осуществляет контроль за квадрокоптером через загрузку его полетного расписания, а также его обслуживание, обеспечивая подзарядку аккумуляторов, замену поврежденных винтов, прием с дрона и дальнейшую передачу видеофайла или результата его анализа от станции к оператору.

***Оператор***

Выступает как конечный получатель данных о состоянии линий инфраструктуры от станции. В его задачи входит анализ предоставленной информации и дальнейшее информирование о возникших происшествиях вышестоящих органов.

Вполне естественно сделать вывод о том, что каждый из представленных элементов осуществляет основополагающую задачу, способствующую работоспособности всего комплекса. Однако внутренняя структура каждого из них вызывает ряд вопросов, которые требуют пояснения. Потому опишем их для каждого из представленных элементов системы.

Структура квадрокоптера представляет собой сочетание множества взаимосвязанных элементов, вместе образующих работоспособную систему, позволяющую осуществлять наблюдение за линиями инфраструктуры.

***Камера***

Позволяет производить видеофиксацию состояния элементов линии инфраструктуры. Помимо стандартной съемки видео, камер также способна фиксировать тепловое излучение от объекта. Таким образом, имеется возможность определить тепловые аномалии, и локализовать место потенциальной аварии, даже в случае отсутствия первичных признаков на простой видеозаписи.

***Управляющая плата***

Осуществляет контроль за положением камеры для лучшего фиксирования состояния линии инфраструктуры, так как при полете может возникнуть ситуация, при которой она выйдет за пределы области фиксирования видеозаписи. Также данная плата, используя данные с датчиков, осуществляет анализ препятствий на пути следования квадрокоптера и принимает решение о предотвращении столкновения и грамотном облете возникшего объекта. Помимо представленных ранее функций, данная плата способна на основе имеющейся информации о состоянии дрона или же по причине получения сигнала от станции принять решение об экстренном завершении миссии и возвращении к ближайшей станции. Это необходимый элемент для обеспечения работоспособности квадрокоптера в автономном режиме. Данная плата позволяет загружать маршрут миссии в квадрокоптер, проводить тестирование его элементов на предмет ошибок и сбоев в системе. Также управляющая плата позволяет при необходимости контролировать остальные механизмы для обеспечения работоспособности станции.

Элементы, образующие собой станцию, представляют достаточно сложные механизмы для обеспечения работоспособности квадрокопте-

ра, а также поддержания связи с оператором для обмена данными.

***Механизмы замены лопастей***

Лопасти квадрокоптера не являются идеальными износостойкими объектами и требуют периодической замены для обеспечения жизнеспособности квадрокоптера в долгосрочной перспективе. Сигналом к проведению операции замены лопастей может служить как достижение времени регламентных работ, так и сигнализация о фактическом износе от соответствующего механизма.

***Механизмы подзарядки аккумулятора***

Для того чтобы обеспечить автономность квадрокоптера в долгосрочной перспективе, необходимо обеспечить либо подзарядку, либо замену аккумуляторов квадрокоптера. Звучит описание данной функции достаточно просто, однако на деле требует достаточной точности работы манипуляторов и сопутствующих механизмов, что порождает достаточно сложную внутреннюю реализацию соответствующего механизма как на аппаратном, так и на программном уровнях.

***Механизм поддержания связи***

Обеспечивает передачу полученной информации оператору, который осуществляет ее анализ и делает соответствующие выводы.

В качестве результата взаимодействия всех представленных элементов мы получаем автономную станцию, способную самостоятельно задавать миссию облета для квадрокоптера, осуществлять подзарядку или замену аккумуляторов и изношенных лопастей, а также осуществлять обмен информацией с оператором, позволяя последнему проводить анализ полученных данных и принимать окончательное решение о дальнейших действиях.

## Заключение

В настоящее время существует несколько разнообразных реализаций для обследования состояния линий инфраструктуры с помощью дронов. Каждая из них имеет хорошие показатели в определенных областях, а также имеет ряд недостатков в других. Представленный проект реализует возможность использования автономного комплекса из дрона и док-станции для обеспечения непрерывного мониторинга состояния линии инфраструктуры, сигнализации об аварийном состоянии его элементов.

В результате использования системы представленных в работе комплексов, расположенных вдоль линии инфраструктуры, позволит оперативно определять место возникновения аварии, определять элементы, представляющие потенциальную возможность возникновения происшествия. Также ввиду автономности каждого комплекса, затраты на их обслуживание существенно снижаются и не требуют титанических усилий.

Стоит отметить тот факт, что в зависимости от потребностей пользователя система способна контролировать маршруты квадрокоптеров различным способом, автоматически регулируя движение квадрокоптеров для решения возникающих в процессе работы коллизий.

Данный комплекс имеет широкий потенциал развития и модернизации. Имеется возможность заменять используемые дроны и элементы док-станции в фиксированных пределах для улучшения работоспособности системы при определенных условиях. Имеется пространство для улучшения, развития и оптимизации программного кода путем наращивания нового функционала или же модернизации уже имеющегося.

**Библиографический список**

1. Статистика аварийности в электросетевом комплексе компании МРСК Юга. URL: https://ar2018.mrsk-yuga.ru/ru/40/140/10 (дата обращения: 15.10.2021).

2. Презентация на тему Причины аварий на газопроводах Европейских стран. URL: https://thepresentation.ru/dizayn/prichiny-avariy-na-gazoprovodah-evropeyskih-stran (дата обращения: 15.10.2021).

3. HIVE Autonomous drone solutions. URL: https://hive.aero (дата обращения: 13.11.2021).

4. DJI Blog. Применение DJI Matrice 300 RTK на предприятиях нефтехимической отрасли. URL: https://dji-blog.ru/naznachenie/neftegaz/primenenie-dji-matrice-300-rtk-na-predprijatijah-neftehimicheskoj-otrasli.html (дата обращения: 15.11.2021).

5. Сайт министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации. URL: https://digital.gov.ru/ru/documents/3634 (дата обращения: 20.11.2021).

6. ГК Геоскан. Беспилотные технологии для профессионалов. URL: https://www.geoscan.aero/ru (дата обращения: 24.11.2021).

**УДК 004.716** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-229**

***В. Е. Степанов****
*ассистент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВЫЗОВЫ МЕТОДОВ МНОГОПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

*Методы многополосной передачи данных – способ увеличить пропускную способность без качественного изменения физических компонентов каналов за счет увеличения числа каналов. В статье рассматриваются проблемы и вызовы, с которыми возможно столкнуться при разработке. Их решение сможет качественно продвинуть методы многополосной передачи.*
***Ключевые слова:*** *многополосная передача данных, SpaceFibre, асимметричные каналы, символы-заполнители.*

***V. E. Stepanov****
*Assistant*
**St. Petersburg State University Aerospace Instrumentation*

# MODERN PROBLEMS AND CHALLENGES OF MULTILANE DATA TRANSMISSION METHODS

*Multiband data transmission methods are a way to increase bandwidth without qualitatively changing the physical components of the channels, by increasing the number of channels. The article discusses the problems and challenges that may be encountered during development. Their solution will be able to qualitatively advance multiband transmission methods.*
***Keywords:*** *multilane data transmission, SpaceFibre, asymmetric links, padding symbols.*

## Введение

Разработка новых методов многополосной передачи данных – актуальная современная задача в области разработки бортовых сетей. Требования к пропускным способностям постоянно растут, многополосная передача позволяет решить данную проблему без качественного изменения физических компонентов каналов. При разработке методов встают схожие проблемы и вызовы, для которых нет универсальных решений или которые требуют специфичных решений при различных обстоятельствах.

Протокол многоканальной передачи – это набор механизмов, которые используются для распределения потока блоков данных (DU) по множеству полос. В данном случае под «полосой» подразумевается один кабель или одна пара приемник-передатчик. Главными чертами многополосных протоколов являются:

– высокоскоростной поток блоков данных, скорость которого выше, чем максимальная скорость одной линии;

– демультиплексор для распределения блоков данных по набору «низкоскоростных» полос;

– набор «низкоскоростных» полос;

– мультиплексор для сбора блоков данных с набора полос;

– результирующий высокоскоростной поток блоков данных с тем же порядком, что и изначальный поток.

Обобщенная структура показана на рис. 1.

Возможны отличия в правилах и механизмах разных протоколов, но главные детали и принципы сохраняются для всех.

## Проблемы и вызовы при разработке методов многополосной передачи данных

В ходе обзора многополосных протоколов [1] PCI-Express [2], SpaceFibre [3], RapidIO [4], LACP [5], MIPI [6] были выделены следующие проблемы и вызовы:

– избавиться от необходимости заданной кратности количества линий;

– рассмотреть возможности отказа от использование дополнительных символов для выравнивания (Padding);

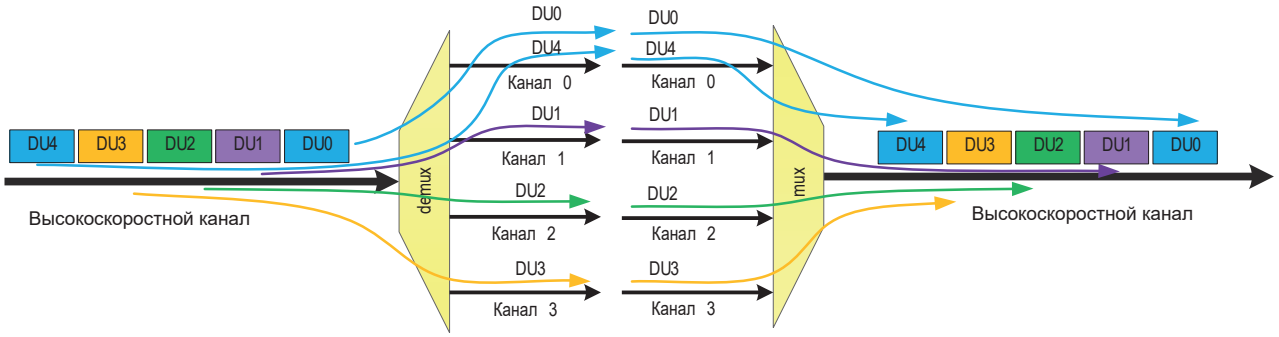



*Рис. 1. Обобщенная структура многополосного протокола*

| Lane 0 | Lane 1 | Lane 2 Disabled | Lane 3 | |
|---|---|---|---|---|
| SDF | SDF | - | SDF | Row |
| Data 0 | Data 1 | - | Data 2 | |
| Data 3 | Data 4 | - | Data 5 | time |
| Data 6 | Data 7 | - | PAD | |
| EDF | EDF | - | EDF | |
| FCT | FCT | - | FCT | |

*Рис. 2. Пример использование символов заполнителей*

– обеспечение поддержки асимметричных каналов;

– обеспечение автоматизированного управления количеством включенных каналов;

– обеспечение взаимодействия с механизмами «планирования».

Но первое, с чем нужно будет определиться, – это уровень распараллеливания, размер блоков данных.

При увеличении размера блока:

– уменьшаются требования по возможной разнице скорости каналов;

– упрощаются требования по синхронизации;

– увеличиваются буферы.

При уменьшении размера блока:

– меньше ожидания в очереди;

– меньший размер буферов;

– потенциально – сложнее восстановление после ошибок;

– выше требования к синхронизации;

– потенциально – появление необходимости в определенной кратности линий, использовании дополнительных символов для выравнивания.

Проблемы необходимой кратности линий и использования символов-заполнителей различаются, но имеют сходные истоки. Данные проблемы появились из-за решения упростить алгоритм распределения, таким образом, чтобы всегда знать с какого канала начинать отправку нового блока данных, как кодировать блоки данных относительно количества линий. На рис. 2 представлен пример распределения слов и заполнителей (PAD) для стандарта SpaceFibre [3].

Очевидно, что проблема символов-заполнителей стоит наиболее остро при большом количестве линий и малом количестве информации в текущей серии блоков данных. На рис. 3 показан график, который показывает отношение символов-заполнителей к полезной нагрузке – чем больше символов-заполнителей и чем меньше серия, тем больше результирующее число.

Возможность организации физически асимметричных каналов крайне важна для бортовых сетей – это позволяет обеспечить необходимую пропускную способность в одном направлении, при этом уменьшить вес результирую-

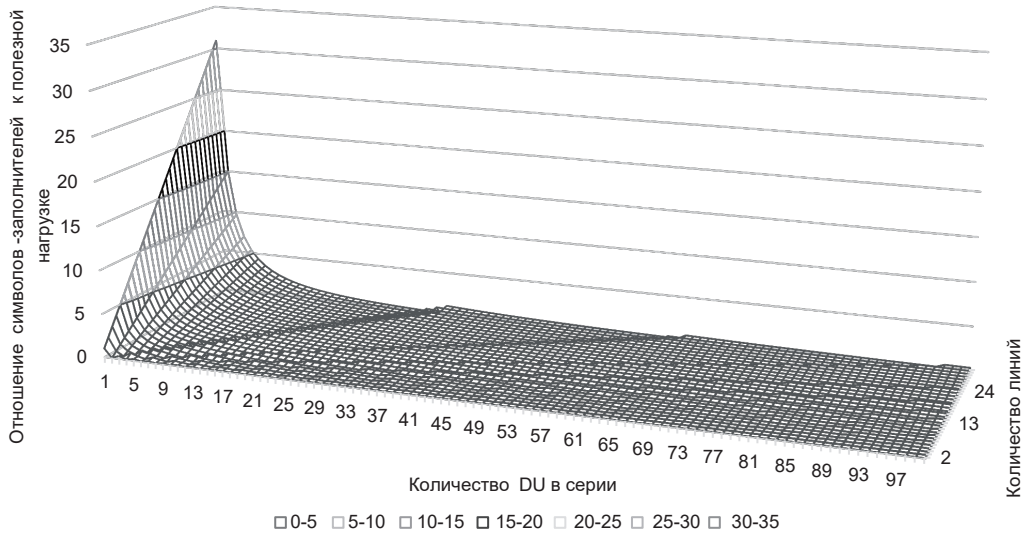



*Рис. 3. Зависимость отношения символов-заполнителей к полезной нагрузке от количества DU в серии и количества линий*

щей системы по сравнению с симметричными каналами. Использование асимметричных каналов ставит новые задачи: если стек протоколов подразумевает установку соединения, то машина состояний для установки усложняется, что можно увидеть на примере SpaceFibre; если контроль потока осуществляется с помощью передачи данных в обратном направлении, то один из двунаправленных каналов должен взять на себя пересылку токенов управления потоком. Либо метод управления потоком должен быть полностью изменен для работы с асимметричными каналами. При неправильной реализации перенаправления токенов управления потоком они могут занять всю пропускную способность двунаправленного канала – при условии, что токен управления потоком отправляется каждые N символов, то N однонаправленных каналов будет достаточно для того, чтобы поток токенов был постоянным.

Обеспечение автоматизированного управления количеством включенных каналов. Необходимость обеспечения автоматизированного управления количеством включенных каналов следует из необходимости уменьшения энергопотребления [7]. Оценить энергоэффективность, не зная характеристик физического уровня проблемно, однако можно сделать несколько предположений:

– неработающий канал не потребляет энергию;

– между узлами точно работает один канал;

– исходя из 1) и 2) можно предположить, что наиболее энергоэффективной системой будет являться та, в которой вообще нет дополнительных каналов – все существующие связи одиночные. Однако сама цель появления и внедрения методов многополосной передачи данных говорит о том, что такие системы не удовлетворяют пользователя по другим параметрам. Зачастую этими параметрами являются пропускная способность сети/скорость/необходимый размер буферов/задержки в передаче;

– в рамках разработки многополосных методов передачи не повышается непосредственно скорость передачи в отдельных полосах/каналах. Следовательно, дальше можно рассматривать пропускную способность сети, и задержки в передаче;

– при прочих равных, эти два параметра можно улучшить, увеличив количество полос.

Таким образом, можно считать, что стоит проблема оптимизации количества дополнительных каналов при заданных параметрах передачи. Решения этой проблемы можно искать либо в теории систем массового обслуживания, либо в теории управления, либо в создании принципиально новых алгоритмов.

Обеспечение взаимодействия с механизмами «планирования». Механизмы «планирования» предназначены для избегания конфликтов распределения канальных ресурсов сети и обеспечения гарантированных задержек доставки в сетях. При сходных задачах с многополосной передачей, подход к решению задач принципиально другой и работает при других условиях и ограничениях. Проблема взаимодействия этих двух методов/механизмов кроет-

ся в том числе в предыдущей рассмотренной проблеме. Если есть необходимость оптимизации количества линий для поддержания определенной энергоэффективности, на первый план выйдет проблема расчета необходимого количества полос и возможности их включения/выключения во время одного участка расписания. Второй большой проблемой может стать «инертность» включения линий, при условии, что стек протоколов тратит хоть сколько-то значительное время на установку соединения. Учитывая время включения соединения отдельной линии SpaceFibre, можно говорить, что для ведущих стандартов бортовых сетей может потребоваться тщательная проработка алгоритмов взаимодействия механизмов «планирования» и многополосной передачи, особенно при малой длительности отдельного участка расписания.

## Заключение

В статье были рассмотрены современные проблемы и вызовы разработки методов многополосной передачи данных, в частности для бортовых сетей. Были рассмотрены такие особенности как заданная кратность линий и использование символов-заполнителей, обеспечение поддержки асимметричных каналов, обеспечение автоматизированного управления количеством включенных каналов и обеспечение взаимодействия с механизмами «планирования». Были рассмотрены возможные проблемы при разработке методов с данными особенностями, были обозначены области науки, в которых может быть найдено решение. Решение обозначенных проблем позволит сделать качественный шаг в развитии методов многополосной передачи данных.

### Библиографический список

1. *Степанов В. Е., Лавровская И. Я.* Многополосные протоколы передачи данных для бортовых сетей // Семидесятая международная студенческая научная конфефренция ГУАП: сб. докл.: в 4 ч. Ч. 1: Технические науки. СПб.: ГУАП., 2017. С. 172.

2. PCI Express Base Specification Revision 3.0. 10 ноября 2010 г. С. 193.

3. SpaceFibre Specification Draft H9 / S. Parkes, A. Ferrer, A. Gonzalez, C. McClements. 2017. P. 133.

4. RapidIO TM Interconnect Specification Part 6: LP-Serial Physical Layer Specification. 2016. P. 115.

5. *Олифер В., Олифер Н.* Компьютерные сети. 3-е изд. СПб., 2008. С. 547.

6. *Rodrigues P.* MIPI Display Serial Interface Interoperability Tests Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2016.

7. *Florit A., Villafranca A., Parkes S.* SpaceFibre. SpaceFibre multi-lane. Long Paper. 2016. P. 3.

**УДК 004.7; 004.9** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-233**

***Е. А. Суворова****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ БУФЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА ВИРТУАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СТАНДАРТА SPACEFIBRE

*Во многих стандартах, применяемых для локальных вычислительных сетей аэрокосмического назначения, используется управление потоком в звене передачи данных. Оно позволяет исключить или существенно снизить количество данных, которое теряется при передаче из-за переполнения приемных буферов сетевых устройств. Этот механизм является частью механизмов обеспечения качества сервиса доставки данных. В частности, механизмов обеспечения гарантированной доставки данных. Также он используется для изоляции потоков данных, относящихся к разным виртуальным каналам, обеспечения гарантированного времени доставки данных, гарантированной пропускной способности, приоритетов для различных виртуальных каналов. Однако наличие механизма управления потоком, как правило, приводит к тому, что в портах сетевых устройств за каждым виртуальным каналом жестко резервируется некоторое количество буферного пространства. Если в какие-то моменты времени по виртуальным каналам отсутствует передача данных, то данное буферное пространство не используется, не может быть передано другим виртуальным каналам. Для современного сетевого оборудования аэрокосмического назначения, как правило, существуют жесткие ограничения по площади. Основную площадь контроллеров портов, реализованных в соответствии с различными стандартами, занимает память, необходимая для организации буферов. При использовании большинства схем кредитования использование недостаточно большого объема буферов приводит к увеличению времени доставки данных за счет того, что передача очередного пакета (фрейма) задерживается из-за отсутствия кредитов. Также это приводит к снижению полезной пропускной способности. Вследствие этого возможность динамического перераспределения буферного пространства между виртуальными каналами может позволить снизить суммарный размер буферного пространства в контроллерах портов и, соответственно, площадь без снижения полезной пропускной способности. В статье предлагается метод динамического перераспределения буферного пространства виртуальных каналов для стандарта SpaceFibre. Выполнены оценки накладных расходов на его реализацию, оценки достижимых временных характеристик. На основе этого определена область применения предложенного метода.*
***Ключевые слова:*** *SpaceFibre, управление потоком в звене передачи данных, качество сервиса передачи данных, динамическая реконфигурация, системы аэрокосмического назначения.*

***E. A. Suvorova****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# METHOD FOR DYNAMIC REALLOCATION OF VIRTUAL CHANNELS BUFFER SPACE FOR THE SPACEFIBRE STANDARD

*Many standards used for aerospace Local Area Networks use flow control in the data link layer. It allows you to exclude or significantly reduce the amount of data that is lost during transmission due to overflow of the receiving buffers of network devices. This mechanism is part of the Quality of Service mechanisms for the data delivery. In particular, in many cases, it is part of the mechanisms for the guaranteed data delivery. It is also used to isolate data streams related to different virtual channels, to provide guaranteed data delivery time, guaranteed bandwidth, priorities for different virtual channels. However, the presence of a flow control mechanism, as a rule, leads to the fact that a certain amount of buffer space is rigidly reserved for each virtual channel in the ports of network devices. If at some points in time there is no data transmission via virtual channels, then this buffer space is not used, cannot be transferred to other virtual channels. Modern aerospace networking equipment typically has significant area constraints. The main area of port controllers implemented in accordance with various standards is occupied by the memory required for buffers. Under most data flow control schemes, the use of insufficient buffers leads to a decrease in useful bandwidth. As a result, the ability to dynamically reallocate the buffer space between virtual channels can reduce the total size of the buffer space in the port controllers and, accordingly, the area without reducing the useful bandwidth. This article proposes a method for dynamic reallocation of the buffer space of virtual channels for the SpaceFibre standard. Estimates of overhead costs for its implementation, estimates of achievable time characteristics are made. On the basis of this, the field of application of the proposed method is determined.*
***Keywords:*** *SpaceFibre, data link flow control, QoS, dynamic reconfiguration, aerospace systems.*

## Введение

Современная электронная компонентная база (ЭКБ) – маршрутизаторы и терминальные узлы, разрабатываемая для локальных сетей аэрокосмического назначения, как правило, разрабатывается с использованием технологии ASIC. По сравнению с технологией FPGA эта технология позволяет обеспечить более низкое энергопотребление, меньшую площадь, более высокие скорости передачи данных, лучшую устойчивость к внешним воздействиям [1]. Однако производство по технологии ASIC является экономически оправданным только в том случае, если является средне или крупносерийным [1]. Соответственно, ЭКБ должна быть достаточно универсальной, чтобы использоваться в различных бортовых сетях, предназначенных для передачи и обработки потоков данных с существенно различающимися характеристиками. При этом должны обеспечиваться требуемые качества сервиса (такие как гарантированная доставка, приоритеты, резервирование пропускной способности, планирование, изоляция отдельных потоков данных) в условиях довольно жестких ограничений по площади. В большинстве стандартов передачи данных, предназначенных для сетей аэрокосмического назначения важнейшей функцией, необходимой для реализации этих механизмов является управление потоком в звене передачи данных. Этот механизм для своей реализации требует наличия больших буферов для обеспечения передачи данных потоков высокой интенсивности, потоков, в которых передаются объекты данных большого размера. Как правило, буферное пространство жестко фиксируется за каждым виртуальным каналом. В случае отсутствия таких буферов время передачи объектов данных может значительно возрастать, может снижаться полезная пропускная способность. В разных применениях, и даже в различных режимах функционирования одной и той же сети, количество таких потоков данных, для которых необходимы большие буфера может значительно варьироваться. Если большие буфера будут реализованы для всех виртуальных каналов, каждый из них может потенциально использоваться для передачи потоков данных с любыми характеристиками. Однако при этом площадь реализации оказывается очень большой, что во многих случаях не приемлемо. При этом в ходе функционирования сети буферное пространство будет использоваться нерационально. Большая часть буферов будет простаивать (не будет использоваться) в течение длительных промежутков времени.

Если же большие буфера будут реализованы для ограниченного количества виртуальных каналов (например, одного или двух), то всегда будет существовать вероятность, что объекты данных большого размера потребуется в разные моменты времени передавать по большему количеству виртуальных каналов, что невозможно будет делать быстро. Например, в системе может иметься четыре видеокамеры, которые передают видеокадры (являющиеся объектами данных большого размера) в одно обрабатывающее устройство. Для передачи данных от этих источников могут использоваться четыре различных виртуальных канала, которые используют физический канал в режиме разделения времени – для каждого виртуального канала выделяется отдельный таймслот, длительность которого потенциально достаточна для передачи одного видеокадра. Буферное пространство каждого виртуального канала будет использоваться только в течение таймслота, в остальное время оно будет простаивать. Если же буфера части из используемых виртуальных каналов будут не достаточного размера, то это приведет к снижению скорости передачи данных и длительности таймслота окажется не достаточным для передачи по ним видеокадра.

Эта проблема существует для большинства современных стандартов локальных сетей, в которых используется механизм кредитования, в том числе и для стандарта SpaceFibre. В данной статье мы предлагаем метод, обеспечивающий решение этой проблемы за счет динамического перераспределения буферного пространства.

## Обзор механизмов управления потоком в стандартах передачи данных локальных вычислительных сетей

*Стандарты на основе Ethernet*

В большинстве стандартов на основе Ethernet отсутствует управление потоком в звене передачи данных [2], [3], [5]. Эти стандарты исходно разрабатывались для сетей, в которых возможность потерять данные из-за неготовности приемника (порта очередного роутера или хаба) на пути передачи пакета являлась меньшей проблемой, чем возникновение перегрузки большой части сети, невозможности передавать данные к разным приемникам из-за того, что один приемник не готов принимать данные. В этих сетях механизмы гарантированной доставки данных традиционно реализовывались по схеме E2E на прикладном или транспортном

уровне. Поскольку для большей части потоков данных они не требовались, достаточно большие накладные расходы на их реализацию во многих случаях оказывались приемлемыми.

Вследствие отсутствия схемы управления потоком в звене передачи данных, при использовании этих стандартов буферное пространство на приемной стороне потенциально может перераспределяться между различными потоками данных в тех случаях, когда определены механизмы распознавания отдельных потоков.

Необходимо отметить, что в настоящее время эта группа стандартов является практически единственной, в которой отсутствует управление потоком в звене передачи данных. В части стандартов, предназначенных для сетей с поддержкой реального времени, таких как TTethernet, управление потоком в звене передачи данных существует в неявной форме [4], [5].

*Serial Rapid IO*

В стандарте Serial Rapid IO (SRIO) в звене передачи данных существует схема управления потоком, которая потенциально позволяет исключить потерю данных из-за неготовности приемника [6].

Передача данных в звене передачи данных идет в терминах пакетов. Максимальный размер пакета в стандарте SRIO ограничен 256. (При передаче к пакету добавляется еще до 16 байтов служебной информации, полная длина ограничена 272 байтами.) Приемная сторона отправляет передающей стороне информацию о количестве пакетов максимальной длины, которое она готова принять. Для передачи этой информации используются специальные поля, выделенные для этого в управляющих символах Idle/Status (отправляемых в отсутствии полезной информации для передачи) и фреймах, используемых для передачи пакетов данных. В этих полях указывается текущий статус буферов на момент формирования управляющих символов. За время, пока данные символы достигнут передающей стороны, информация о состоянии буферов приемной стороны может устареть. Это происходит, если:

(1) в это время передающая сторона выполняет передачу пакетов (фактически в буферах приемной стороны будет меньше места);

(2) если из буфера приемной стороны пакеты отправляются дальше (фактически в буферах приемной стороны будет больше места).

В случае (1) может возникнуть ситуация, когда будут переданы данные, для которых в буфере места нет. Приемная сторона отправляет передающей стороне управляющий код Retry, показывающий, что для пакета нет места в приемном буфере. (В SRIO поддерживается три типа кодов подтверждения: ACK отправляется в случае успешного приема пакета, NACK – в случае, если в принятом пакете выявлена ошибка и RETRY в случае, если в приемном буфере нет свободного места.)

Таким образом, данная схема не ориентирована на полное исключение повторных передач из-за неготовности приемника. Однако позволяет существенно сократить их количество.

В стандарте SRIO существует возможность разделения потоков данных. В звене передачи данных поддерживается до восьми отдельных потоков данных. Каждому потоку данных может быть назначен свой уровень приоритета и/или номер виртуального канала. Для каждого потока данных может быть определен свой уровень заполненности буферов на приемной стороне, при достижении которого пакеты, принадлежащие данному потоку, перестают приниматься. При их получении приемная сторон отбрасывает тих и отправляет передающей стороне управляющий символ RETRY. Как правило, для потока трафика наивысшего приоритета (например, командного трафика) уровень заполненности буферов устанавливается в максимальное значение, равное количеству буферного пространства. Такие пакеты должны приниматься, если имеется хотя бы один свободный буфер. Для менее значимого трафика может быть указано, что пакет принимается только в том случае, если имеется N свободных буферов (в противном случае пакет отбрасывается). Это позволяет зарезервировать некоторое количество буферного пространства для высокоприоритетного трафика. В результате если движение пакетов низкоприоритетного трафика в сети окажется по каким-то причинам заблокировано или сильно замедлено, высокоприоритетный трафик можно будет по-прежнему передавать.

При такой схеме управления потоком за каждым потоком резервируется не конкретный набор буферов, а некоторый объем буферного пространства. Потенциально для каждого потока может использоваться любой свободный буфер. В результате существует возможность динамического перераспределения буферов на приемной стороне. Уровни заполненности буферов можно менять в процессе функционирования сети (для этой настройки не требуется останавливать передачу данных), что позволяет подстроить каналы передачи если в процессе функционирования изменяется режим работы, характеристики потоков. Кроме того, если не-

сколько виртуальных каналов имеют одинаковый приоритет, для них определен одинаковый уровень заполненнности буферов, и в какой-то момент времени по одному из виртуальных каналов данные не передаются, то все буфера могут быть использованы для данных, передающихся по другим виртуальным каналам. Это является очень существенным достоинством. Однако необходимо отметить, что у этой черты есть и обратная сторона. Существенно снижается изоляция потоков друг от друга. Если по каким-то причинам передача данных по одному из виртуальных каналов окажется заблокированной, то заблокированы будут и все другие виртуальные каналы, для которых определен такой же или более низкий уровень заполненности.

*Infiniband*

В стандарте Infiniband существует схема управления потоком на уровне звена передачи данных [7]. Управление потоком осуществляется отдельно для каждого виртуального канала/линии (Virtual Line, VL). Используется абсолютная (absolute) схема кредитования. Приемная сторона отправляет передающей стороне информацию о количестве данных, которые можно передать. Передающая сторона периодически посылает приемной стороне информацию о количестве данных, которые фактически были переданы. Это необходимо, для того, чтобы синхронизировать состояние приемной и передающей стороны. (Рассинхронизация может происходить из-за потерь передаваемых пакетов данных и служебных пакетов, содержащих информацию о кредитовании.)

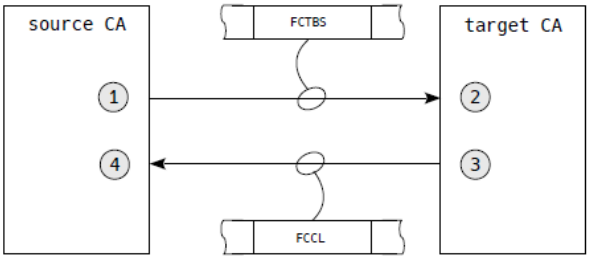



*Рис. 1. Схема обмена информацией*

Для управления потоком используются специальные пакеты – Flow Control Packet. Эти пакеты включают в себя номер виртуального канала (VL), позволяющий идентифицировать канал, к которому относится данный пакет, значение счетчика FCTBS (Flow Control Total Blocks Sent) и значение счетчика FCCL (Flow Control Credit Limit). Счетчик FCTBS показывает текущее количество блоков данных, переданных с момента установки соединения. Размер блока данных (максимальный) равен 64 байтам. Для передачи пакета данных может использоваться один или несколько блоков. Если размер пакета больше 64 байтов, то для его передачи используется несколько блоков размером 64 байта и один (последний) блок, размер которого может быть меньше 64 байтов.

Схема обмена информацией иллюстрируется рис. 1.

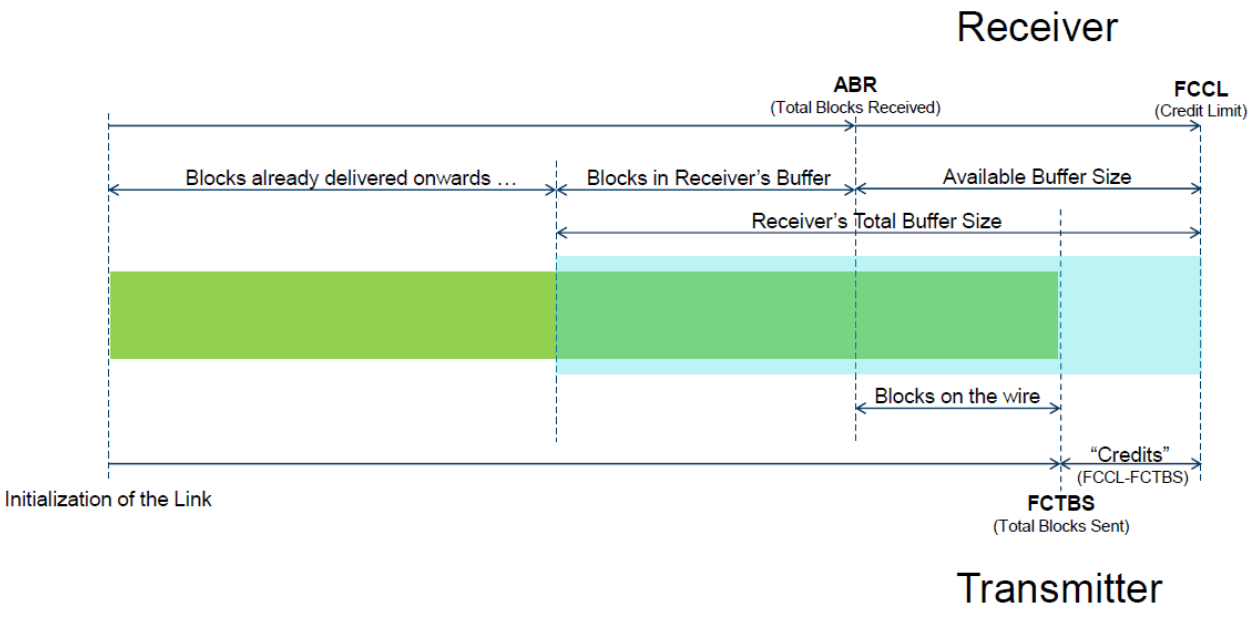



*Рис. 2. Схема работы счетчиков на приемной и передающей стороне*

На приемной стороне имеется счетчик принятых блоков ABR (Adjusted Blocks Received). Этот счетчик устанавливается в 0 при инициализации линка. Он инкрементируется при приеме очередного пакета. Схема работы этих счетчиков на приемной и передающей стороне иллюстрируется рис. 2.

Значение счетчика FCCL определяется в соответствии со следующей формулой:

$$\text{FCCL} = \text{ABR} + \text{«Available Buffer Space»} \quad (1)$$

Количество кредитов (количество блоков данных, которое может быть отправлено) вычисляется на передающей стороне в соответствии со следующей формулой:

$$\text{Credits} = \text{FCCL} - \text{FCTBS} \quad (2)$$

Передача пакета может быть запущена только в том случае, если количество кредитов достаточно для его передачи. (Не допускается передать некоторую часть пакета, в ожидании, что потом в дальнейшем появится достаточное количество кредитов для передачи остальной части пакета.)

Данная схема управления потоком не предусматривает возможности динамического перераспределения буферного пространства. Уменьшение буферного пространства, выделенного одному из виртуальных каналов потенциально может привести к потере передаваемых данных, поскольку передающая сторона может не своевременно получить обновленную информацию о количестве кредитов.

*SpaceFibre*

В стандарте SpaceFibre используется схема управления потоком в звене передачи данных [8]. Управление потоком осуществляется отдельно для каждого виртуального канала. Схема организована таким образом, чтобы полностью исключить потери данных из-за того, что в буфере на приемной стороне отсутствует свободное место.

Для обеспечения этого используется схема кредитования от приемника. Приемная сторона посылает передающей стороне информацию о количестве данных, которые она может принять. Для передачи этой информации используются специальные управляющие символы FCT. В FCT указывается номер виртуального канала, информация о котором передается. Один FCT соответствует кредиту на прием 256 символов Nchar. (К символам Nchar относятся байты данных, символы концов пакетов EOP и EEP, а также символ-заполнитель FILL, который может использоваться для выравнивания границ пакетов.) Если на приемной стороне имеется свободное буферное пространство, большее, чем 256 Nchar, то может быть отправлено несколько символов FCT. Необходимо отметить, что в соответствии со стандартом SpaceFibre размер буфера для каждого виртуального канала должен быть не менее 256 NChar и должен быть кратным 256 Nchars.

Количество символов FCT, которое может быть отправлено, определяется по следующей формуле:

$$Nf = [\frac{Nb}{256}], \quad (3)$$

где $Nf$ – количество FCT, которые могут быть отправлены; $Nb$ – количество свободного буферного пространства (количество Nchar, которое может быть размещено в этом буферном пространстве), которое не было откредитовано ранее.

На приемной стороне для каждого виртуального канала имеется счетчик откредитованного буферного пространства. На передающей стороне для каждого виртуального канала имеется счетчик кредитов. В начале работы, после сброса звена передачи данных, эти счетчики устанавливаются в 0.

В начале работы, после сброса, приемная сторона каждого виртуального канала отправляет один или несколько FCT (в соответствии с размером буферного пространства). Счетчик откредитованного буферного пространства инкрементируется в соответствии с количеством отправленных FCT. На передающей стороне счетчик кредитов увеличивается на 256 при приеме каждого очередного FCT.

Если на передающей стороне имеются данные для передачи и значение счетчика кредитов больше 0, то данный виртуальный канал может передавать данные. Очередность передачи данных от нескольких виртуальных каналов в физический канал в звене передачи данных определяется арбитром в соответствии с параметрами качества сервиса, заданными для каждого виртуального канала. По мере передачи Nchar счетчик кредитов декрементируется. Если очередной FCT приходит одновременно с отправкой Nchar, то счетчик кредитов модифицируется с учетом обоих этих действий. На уровне виртуальных каналов в соответствии со стандартом SpaceFibre при передаче данных никак не отслеживаются границы пакетов. В стандарте SpaceFibre максимально допустимый размер пакета не ограничен. Если кредитов недостаточно для передачи целого пакета, то его передача все равно может быть начата,

в отличие от таких стандартов как Serial Rapid IO и Infiniband.

На приемной стороне по мере поступления данных от передающей стороны и передачи их на сетевой уровень счетчик откредитованного буферного пространства декрементируется. Если разница между размером буфера и счетчиком откредитованного буферного пространства составляет 256, то приемная сторона отправляет очередной FCT и инкрементирует счетчик откредитованного буферного пространства.

В случае возникновения ошибок при передаче данных и FCT по физическому каналу, они могут быть утрачены (приняты на приемной стороне с ошибками). Для выявления такого рода ошибок передача по физическому каналу осуществляется фреймами, каждый из которых снабжается контрольной суммой (CRC) и порядковым номером. Это позволяет выявлять ошибки внутри фреймов и потерю фреймов. В случае выявления ошибок приемная сторона информирует передающую сторону и выполняется повторная передача фреймов. Повторно передаются все фреймы, номера которых больше (циклически) номера фрейма, который был последним, принятым корректно. Данный механизм повторных передач расположен в звене передачи данных на подуровне, обеспечивающем гарантированную доставку данных, находящемся ниже подуровня виртуальных каналов. За счет наличия этого механизма исключается потеря символов FCT и фреймов данных (за исключением случая отказа физического канала, приводящего к невозможности его дальнейшего функционирования).

Таким образом, передающая сторона всегда располагает информацией о том, какое количество данных может быть передано, чтобы исключить переполнение буфера на приемной стороне.

Также необходимо отметить, что используемый механизм кредитования, наряду с другими механизмами, позволяет исключить взаимовлияние между виртуальными каналами в звене передачи данных, что существенно для многих систем реального времени.

Однако механизм кредитования, используемый в стандарте SpaceFibre не позволяет динамически изменять (уменьшать) количество буферного пространства, используемого каждым виртуальным каналом. Как было показано выше, это может приводить к нерациональному использованию буферного пространства, снижению полезной пропускной способности.

Таким образом, среди рассмотренных стандартов с поддержкой механизма кредитования в звене передачи данных только в стандарте Serial RIO существует возможность динамического перераспределения буферного пространства между разными потоками данных, потоками данных, относящимися к разным виртуальным каналам.

## Предлагаемый механизм динамического перераспределения буферного пространства

В данном разделе мы предлагаем модификацию стандарта SpaceFibre, позволяющую выполнять динамическое перераспределение буферов между виртуальными каналами.

В стандарт предлагается добавить возможность объединять виртуальные каналы, для которых возможно перераспределение буферного пространства, в группы. В одном звене передачи данных может поддерживаться несколько групп. Каждый виртуальный канал может принадлежать только одной группе. (В дальнейшем планируется выполнить оценку, является ли это ограничение существенным и при необходимости рассмотреть возможность его устранения.) В звене передачи данных на приемной и передающей стороне количество групп должно быть одинаково, в каждую группу должны входить виртуальные каналы с одинаковыми порядковыми номерами.

По-прежнему каждый виртуальный канал может не принадлежать ни одной из групп и функционировать в соответствии с базовой версией стандарта SpaceFibre. Конфигурирование каждого виртуального канала и его принадлежности к группе может выполняться только при запрете (сбросе) звена передачи данных.

На приемной стороне буферное пространство всех виртуальных каналов, принадлежащих одной группе, разделяется на отдельные сегменты, размер которых равен 256 Nchar. Размер сегмента соответствует размеру одного кредита. В разные моменты времени сегменты могут использоваться разными виртуальными каналами в рамках группы. Однако если сегмент начал использоваться одним виртуальным каналом, то в него не могут быть загружены данные, принадлежащие другому виртуальному каналу, до тех пор, пока из него не будут полностью вычитаны данные, относящиеся к предыдущему виртуальному каналу.

Каждому такому сегменту ставится в соответствие признак того, используется он в данный момент или нет и номер виртуального канала, для которого он используется в текущий момент времени.

Каждой такой группе присваивается уникальный порядковый номер (в пределах звена передачи данных). Нумерация групп начинается с номера на единицу больше максимального номера виртуального канала в звене передачи данных. На приемной стороне буферное пространство, относящееся к виртуальным каналам одной группы, с точки зрения кредитования рассматривается как единое буферное пространство. Группе ставится в соответствие единый счетчик откредитованного буферного пространства. (Отдельные счетчики откредитованного адресного пространства виртуальных каналов, входящих в группу, в этом режиме не используются.) В отправляемых FCT указываются порядковые номера групп. (Приемные стороны виртуальных каналов, входящих в состав групп не выполняют отправку FCT с номерами этих виртуальных каналов.)

На передающей стороне для группы так же используется общий счетчик кредитования, который инкрементируется при поступлении каждого очередного FCT.

Передача фреймов данных, относящихся к виртуальным каналам, принадлежащим группе, осуществляется с сохранением принадлежности к виртуальному каналу. В каждом передаваемом фрейме данных указывается номер виртуального канала.

Каждый виртуальный канал в группе передает данные фреймами максимального размера (256 Nchar). Передача одного фрейма должна использовать целый кредит (256). На приемной стороне, соответственно, будет занят целиком один сегмент памяти. Такая схема позволяет исключить рассинхронизацию кредитования и блокировки (невозможность передачи данных при ненулевом счетчике кредитов).

Если количество данных в виртуальном канале на передающей стороне меньше 256, то фрейм может быть дополнен символами FILL. (Это может происходить при передаче коротких пакетов или хвостов пакетов, длина которых не кратна 256.)

Передача символов заполнителей до некоторой степени может снизить полезную пропускную способность в канале. Оценки этого будут приведены в следующем разделе.

Необходимо отметить, что так же, как и в случае стандарта SRIO, этот метод поддержки динамического перераспределения буферного пространства несколько снижает изоляцию потоков данных, передаваемых в одной группе. Возможна ситуация, когда один поток займет все имеющиеся буфера и передача его будет заблокирована. Это приведет к блокировке всех остальных потоков, входящих в состав группы. Однако использование механизма таймаутов, имеющегося в базовой версии стандарта SpaceFibre, позволяет исключить длительные блокировки такого рода.

## Оценка характеристик предлагаемого механизма

Оценим накладные расходы на реализацию предлагаемого механизма – дополнительную площадь на кристалле, необходимую для его реализации.

Численные оценки были выполнены для реализации звена передачи данных SpaceFibre (порта SpaceFibre) с возможностью параметрически менять количество виртуальных каналов, количество буферной памяти в виртуальных каналах. Для оценки площади был выполнен синтез с использованием инструментария Cadence Genus 19.2. Для синтеза использовались технологические библиотеки 180–45 нм. Для оценки рассматривались варианты реализации с 3, 4, 6 и 8 виртуальными каналами. Три виртуальных канала является минимальным количеством виртуальных каналов, при котором может быть получен заметный выигрыш полезной пропускной способности за счет объединения виртуальных каналов в группы. Восемь виртуальных каналов – это максимальное количество виртуальных каналов, которое может быть реализовано в одном порту без существенных технологических проблем с использованием доступных технологических библиотек.

На рис. 3 представлены соотношения площадей отдельных уровней для базовой реализации порта SpaceFibre (размер буферов виртуальных каналов – 1024 Nchar, 4 виртуальных канала). Данная диаграмма показывает, что ре-

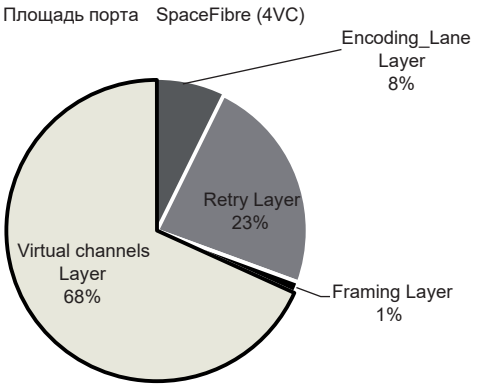



*Рис. 3. соотношения площадей отдельных уровней для базовой реализации порта SpaceFibre*

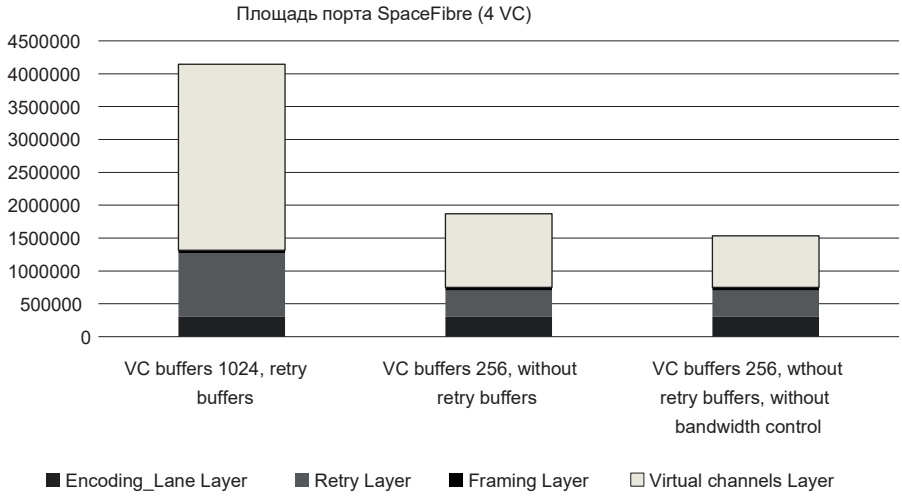



*Рис. 4. Зависимость площади порта SpaceFibre от размеров буферов виртуальных каналов*

ализация уровня виртуальных каналов занимает большую часть площади порта.

На рис. 4 представлены соотношения площади отдельных уровней для базовой реализации порта SpaceFibre при размере буферов виртуальных каналов 1024 Nchars и 256 Nchars. Данная диаграмма показывает, что уменьшение размера буферов с 1024 до 256 позволяет сократить площадь порта более чем в два раза.

На рис. 5 представлены графики соотношения площадей для рассмотренных реализаций. График с названием «256–512» соответствует вариантам реализации, в которых часть буферов в базовой конфигурации имеет минимальный размер 256 Nchar. График с названием 512 соответствует варианту реализации, в котором в базовой конфигурации все буфера имеют размер 512 Nchar.

Как можно видеть из этих графиков, накладные расходы на реализацию для рассмотренных вариантов не превосходят 13,5 %. Накладные расходы растут с увеличением количества виртуальных каналов, но не значительно. При использовании большего объема буферной памяти накладные расходы оказываются меньше. Это происходит из-за того, что площадь дополнительных автоматов, необходимых для реализации предложенного механизма существенно меньше размера одного блока памяти, необходимого для хранения 256 Nchar.

Данное увеличение площади в 5–7 раз меньше выигрыша по площади за счет уменьшения размера буферов виртуальных каналов. Таким образом, использование данного механизма позволяет сократить площадь контроллера порта в два и более раз.

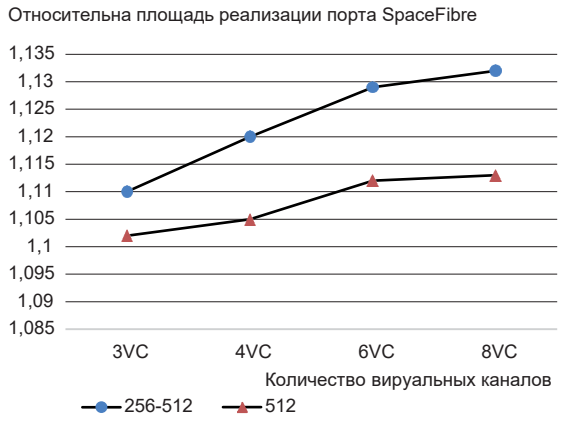



*Рис. 5. Соотношение площади порта SpaceFibre с возможностью динамического перераспределения буферного пространства и площади базовой реализации порта SpaceFibre*

Оценим временные характеристики при передаче потоков данных.

На рис. 6 представлена полезная пропускная способность для отдельного виртуального канала в зависимости от фактического количества фреймов, необходимого для передачи объектов данных. мы рассматриваем случай, близкий к худшему возможному, когда в последнем передаваемом фрейме используется примерно 10 % (остальная часть фрейма заполняется символами FILL, за счет чего и происходит снижение полезной пропускной способности).

Как можно видеть, с увеличением количества фреймов SpaceFibre, необходимых для передачи объекта данных полезная пропускная способность быстро стремится к 1. При размере объекта данных около 4 Кбайт полезная про-

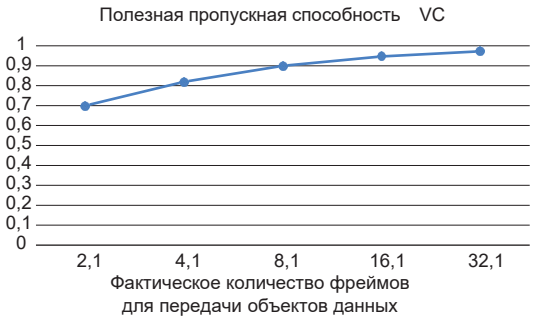



*Рис. 6. полезная пропускная способность виртуального канала*

пускная способность составляет 0,97. Таким образом, для передачи больших объектов данных, таких как видеокадры, снижение полезной пропускной способности из-за дополнения последнего фрейма символами FILL является пренебрежимо малым.

Выполним оценку времени передачи данных через звено передачи данных.

Время передачи одного FCT может быть определено по следующей формуле:

$$Tfct = Tch * Lfct + Td, \quad (4)$$

где *Tfct* – время передачи FCT; *Td* – время задержки одного символа в конвейере звена передачи данных; *Lfct* – длина одного FCT (в битах) равная 40 битов; *Tch* – время передачи одного бита по физическому каналу (обратно пропорционально частоте передачи).

Идеальное время передачи пакета через звено передачи данных (в отсутствии ожидания FCT) можно определить по следующей формуле:

$$Tpe = Tch * Lpf + Td\ , \quad (5)$$

где Tpe – идеальное время передачи пакета через звено передачи данных; Lpf – длина пакета с учетом дополнения до фреймов максимального размера.

Она может быть определена по следующей формуле:

$$Lpf = (]\frac{Lp}{256}[) \cdot 264 \cdot 10, \quad (6)$$

где *Lp* – длина пакета; 256 – длина поля данных фрейма; 264 – длина фрейма с учетом накладных расходов на заголовок и концевик.

Время передачи пакета с учетом ожидания FCT может быть определено по следующей формуле:

$$Tp = ]\frac{Lpf}{Bsize}[\times((Tch \cdot Lf + Td) \cdot Bsize + Dfct), \quad (7)$$

где *Tp* – фактическое время передачи пакета; *Bsize* – размер буферного пространства на приемной стороне (в сегментах по 256 Nchar); *Lf* – длина одного фрейма (264 байта); *Dfct* – задержка, вызванная ожиданием FCT.

Задержка, вызванная ожиданием FCT, может быть определена по следующей формуле:

$$\begin{aligned} &Dfct = 0, \\ &\text{если } (Tn + Tfct - (Tch \cdot Lf + Td) \cdot (Bsize - 1)) <= 0 \\ &Dfct = Tn + Tfct - (Tch \cdot Lf + Td) \cdot (Bsize - 1), \\ &\text{если } (Tn + Tfct - (Tch \cdot Lf + Td) \cdot (Bsize - 1)) > 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где *Tn* – время передачи фрейма данных на сетевой уровень.

На рис. 7 приведены графики зависимости соотношения фактического и эталонного времени передачи пакета от размера пакета при разных размерах приемного буфера (256, 512, 768 Nchar). Графики слабо зависят от длины кабеля, но могут сильно зависеть от готовности/неготовности сетевого уровня к передаче пакета. В представленном примере предполагалось, что сетевой уровень всегда готов к приему данных. (Если сетевой уровень может в течение достаточно длительного времени находиться в состоянии неготовности, то Rp пропорционально вырастет.)

Как можно видеть из этих графиков время передачи пакета при размере буфера 256 в два раза хуже эталонного, при размере буфера 512 оно практически совпадает с эталонным. (Дальнейшее увеличение размера буфера целесообразно только в тех случаях, когда сетевой уро-

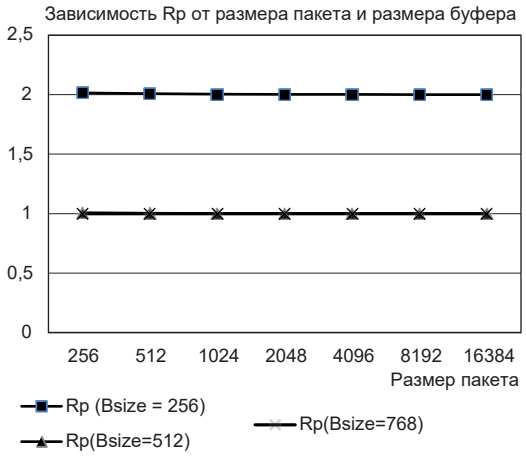



*Рис. 7. Зависимость соотношения фактического и эталонного времени передачи пакета от размера буфера виртуального канала на приемной стороне и от размера пакета*

вень может быть длительно не готов к дальнейшему приему данных.)

Таким образом, если в системе имеется *N* виртуальных каналов, размер приемного буфера для каждого из которых составляет 256 Nchar и существует возможность объединять их в группы по два виртуальных канала с возможностью динамического реконфигурирования буферного пространства, этого достаточно для обеспечения скорости передачи пакетов близкой к эталонной, если сетевой уровень всегда готов к приему данных. Если сетевой уровень может быть длительно не готов к приему данных, то может использоваться объединение 3–4 виртуальных каналов в группу.

Таким образом, предложенный метод динамического перераспределения адресного пространства позволяет в разы снижать площадь реализации порта SpaceFibre без увеличения времени передачи данных.

## Заключение

В статье рассмотрены современные стандарты, используемые для локальных вычислительных сетей аэрокосмического назначения. Проанализированы схемы управления потоком в звене передачи данных, используемые в этих стандартах. Показано, что только в стандарте Serial Rapid IO используется схема управления потоком, допускающая динамическое перераспределение буферного пространства. Эта схема не может быть напрямую использована для стандарта SpaceFibre.

В статье предложен механизм, позволяющий выполнять динамическое перераспределение буферного пространства виртуальных каналов SpaceFibre. Этот механизм предназначен для сокращения времени простоя (неиспользования) отдельных буферов, вследствие того, что по соответствующим виртуальным каналам трафик данных передается не постоянно. Он позволяет использовать меньшее количество буферного пространства в портах SpaceFibre.

В статье выполнены оценки накладных расходов на реализацию данного механизма. Показано, что увеличение площади, связанное с реализацией данного механизма невелико. Площадь порта с возможностью динамического перераспределения буферов может быть в 2–4 раза меньше, чем площадь порта с фиксированными размерами буферов, позволяющими передавать без задержек объекты данных большого размера.

В статье выполнена оценка снижения полезной пропускной способности для отдельного виртуального канала в случае если длина передаваемых объектов данных не является кратной максимальному размеру фрейма. Показано, что при размере объекта данных около 4 Кбайт (что существенно меньше размера видеокадра) снижение полезной пропускной способности становится пренебрежимо малым.

В статье выполнена оценка зависимости времени передачи данных в звене передачи данных от размера приемного буфера виртуального канала. Показано, что использование буферов виртуальных каналов минимального размера (256 Nchar) в сочетании с возможностью динамического перераспределения адресного пространства позволяет исключить увеличение времени передачи данных, вызванное ожиданием приема FCT.

В дальнейшем планируется оценить, существенно ли ограничивают область применения ряд ограничений, имеющихся у предложенного метода, при необходимости разработать модификацию метода, позволяющую их устранить.

### Библиографический список

1. International Roadmap for Devices and Systems (IRDS) 2021 Edition, 2021.

2. *Felser M.* Real-Time Ethernet – Industry Prospective. Proceedings of the IEEE 93 (6). 2005. P. 1118–1129.

3. Tethernet – A powerful Network Solution for All Purposes. TTTech. 2010. 15 p.

4. Time-Triggered Ethernet. European Space Agency. 2020.

5. *Felser M.* Real Time Ethernet: Standardization and implementations. Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium. 2010. 7 p.

6. RapidIO Part 1: Input/Output Logical Specification 4.1. RapidIO.org. 2017. 1521 p.

7. InfiniBand Architecture Release 1.2. Vol. 1. General specifications. InfiniBand Trade Association. 2004. 1677 p.

8. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C // ESA-ESTEC. Noordwijk, The Netherlands. 2019. 233 p.

**УДК 004.7; 004.9** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-243**

***Е. А. Суворова****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MPI В СЕТЯХ SPACEFIBRE

*Локальные сети аэрокосмического назначения на базе стандарта SpaceFibre могут использоваться для организации распределенных вычислений. Стандартом де факто в области современных распределенных вычислений является стандарт MPI. В настоящее время существует большое количество его реализаций для сетей на базе различных стандартов, в частности Ethernet и Infiniband. Часть из этих реализаций является полностью программной, часть – программно-аппаратной. Эффективность этих реализаций (достижимые характеристики по времени обмена данными, накладные расходы на реализацию) очень сильно зависят от того, насколько задействованы возможности сетевых стандартов передачи данных, насколько они согласованы с механизмами MPI. В данной статье приведен анализ возможностей стандарта SpaceFibre для реализации MPI, показаны основные достоинства и ограничения. Показан путь устранения этих ограничений за счет использования нового транспортного протокола с возможностью динамической реконфигурации. Приведены оценки реализуемости такого протокола.*
***Ключевые слова:*** *SpaceFibre, высокопроизводительные вычисления, Message Passing Interface, динамическая реконфигурация, системы аэрокосмического назначения, RISC-V.*

***E. A. Suvorova****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# ORGANIZATION OF DISTRIBUTED COMPUTING USING MPI IN SPACEFIBRE NETWORKS

*Aerospace Local area networks based on the SpaceFibre standard can be used to organize distributed computing. The de facto standard in the field of modern distributed computing is the MPI standard. Currently, there are a large number of its implementations for networks based on various standards, in particular Ethernet and Infiniband. Some of these implementations are completely software, some are software-hardware. The efficiency of these implementations (attainable characteristics in terms of data exchange time, overhead costs for implementation) strongly depends on how much the capabilities of network data transmission standards are involved, how much they are consistent with the MPI mechanisms. This paper provides an analysis of the capabilities of the SpaceFibre standard for the implementation of MPI, showing the main advantages and limitations. A way of eliminating these limitations by using a new transport protocol with the possibility of dynamic reconfiguration is shown. The estimates of the realizability of such a protocol are given.*
***Keywords:*** *SpaceFibre, High Performance Computing, Message Passing Interface, Dynamicreconfiguration, systems for aerospace equipment, RISC-V.*

## Введение

Многие современные высокопроизводительные вычислительные системы (high-performance computing systems – HPC) представляют собой распределенные системы на базе локальных сетей. Большинство из таких систем является системами с распределенной памятью. Важной характеристикой HPC систем является время выполнения задач. Оно зависит как от производительности вычислительных узлов сети, используемых алгоритмов вычислений, так и от организации коммуникаций, механизмов обмена данными между узлами в процессе вычислений [2], [3].

В HPC системах с физически распределенной памятью для организации взаимодействия между вычислительными узлами, как правило, используется обмен сообщениями. Стандартом де-факто в настоящее время в этой области является Message Passing Interface (MPI) [2]–[6].

Использование MPI позволяет организовывать вычисления разной степени гранулярности. Возможно масштабирование систем по количеству вычислительных узлов в широких пределах. В настоящее время существует боль-

шое количество реализаций MPI для сетей на базе различных протоколов на основе Ethernet, для сетей Infiniband [2]–[12].

В данной статье оценивается возможность реализации MPI для сетей на базе стандарта SpaceFibre и допустимые ограничения. Предлагается вариант устранения этих ограничений за счет разработки протокола передачи данных транспортного уровня с возможностью динамической реконфигурации. Приводятся оценки достижимых характеристик для варианта реализации транспортного протокола.

## Особенности протокола MPI

При использовании стандарта MPI в HPC системе все процессы (приложения), выполняющие одну и ту же вычислительную задачу, объединяются в группу. Процессы, принадлежащие одной группе, взаимодействуют друг с другом обмениваясь сообщениями, содержащими объекты данных и служебную информацию [13].

В MPI специфицированы различные схемы обмена объектами данных между приложениями. В простейшем случае обмен данными может осуществляться между одним источником и одним приемником (функции Send и Receive). Могут использоваться и более сложные схемы, при использовании которых обмены носят групповой характер (gather и scatcher). В ходе этих обменов одно приложение может рассылать объект данных всем остальным приложениям (scatcher); объекты данных от всех приложений могут поступать в одно приложение (gather). В рамках одного алгоритма (для решения одной задачи) могут использоваться различные схемы обмена.

Наряду с функциями Send и Receive могут использоваться функции put и get, обеспечивающие прямые обращения одного приложения к память другого приложения.

В MPI специфицированы различные варианты процесса отправки и приема данных.

Данные от приложения источника перед передачей могут перезаписываться в память драйвера, управляющего процессом передачи данных через сеть. В другом варианте данные могут передаваться непосредственно из памяти приложения-источника. В этом случае отсутствует необходимость их перезаписи в память нижележащих уровней и связанные с этим дополнительные задержки и аппаратные затраты на организацию дополнительных буферов. Однако в этом случае приложение-источник не должно использовать данную область памяти до завершения передачи данных. Поддержка этого связана с дополнительными накладными расходами.

На стороне приемника данные также могут записываться сначала в память драйвера и потом перезаписываться в память приложений, либо сразу же записываться в память приложений. Так же, как и в случае с передающей стороной, это позволяет сократить время обработки данных, но приводит к усложнению схемы управления памятью в приложении.

Источник данных может начинать передавать данные не зависимо от текущего состояния приемника, его готовности. В этом случае, если к моменту поступления данных приемник находится в состоянии готовности (процессы обработки данных в источнике и приемнике протекают синхронно), то время обмена данными, накладные расходы на передачу данных минимальны. Однако если приемник не готов, то данные могут начать забивать сеть, потенциально они могут блокировать передачу других потоков данных.

Источник может перед началом передачи запрашивать, готов ли приемник и передавать данные только в том случае, если имеется достаточно места для их приема. В этом случае требуется дополнительный обмен служебными сообщениями между источником и приемником. Это может увеличить время, затрачиваемое на обмен данными, однако позволяет исключить перегрузку сети в случае неготовности приемника.

Разные схемы приема/отправки связанны с различными накладными расходами на реализацию, при их использовании нагрузка на ресурсы сети и терминальных узлов может быть различной. Время передачи данных при использовании разных схем так же будет различным. Однако оно зависит и от особенностей решаемых в системе задач, от особенностей реализации терминальных узлов на аппаратном и программном уровне.

Кроме служебных механизмов, непосредственно связанных с передачей данных, в MPI специфицирован механизм барьерной синхронизации. Он может быть использован для синхронизации различных этапов вычислений, выполняемых различными процессами, для организации доступа к разделяемым ресурсам. При использовании этого механизма каждый процесс по достижении некоторого этапа выполнения, называемого барьером должен разослать служебное сообщение всем остальным процессам, входящим в группу. Каждый из процессов может продолжить свое выполнение

только после того, как получит служебные сообщения от всех остальных процессов.

В одной HPC системе параллельно может выполняться несколько задач. Соответственно, параллельно может существовать несколько групп процессов. В каждом вычислительном узле может поддерживаться выполнение нескольких процессов. Эти процессы могут относиться к одной или разным группам. Процессы могут выполнять обмены данными параллельно. При этом очень важно, чтобы на выполнение обменов данными между процессами одной группы не оказывали влияния обмены данными между процессами других групп. Важно также, чтобы и параллельно выполняемые обмены данными в рамках одной группы не оказывали заметного влияния друг на друга.

Взаимовлияние между различными потоками данных может происходить из-за конкуренции за ресурсы коммуникационной системы. Одни и те же каналы передачи данных, входные и выходные порты маршрутизаторов, ресурсы сетевого уровня маршрутизаторов могут использоваться для передачи потоков данных между различными приложениями. Механизмы поддержки качества сервиса доставки данных (Quality of Service (QoS), которые могут поддерживаться в коммуникационной системе, позволяют упорядочить доступ к ресурсам. Например, они могут позволять исключить монополизацию использования ресурсов одним потоком данных, блокировку ресурса, обеспечить гарантированное время доставки данных. Таким образом, характеристики реализации MPI сильно зависят от выбора стандарта коммуникационной системы, от поддерживаемых в нем механизмов QoS.

Взаимовлияние между потоками данных так же может происходить из-за неготовности процессов к приему объектов данных (в тех случаях, когда используется обмен данными, пи котором передающая сторона не учитывает готовность приемной стороны к приему данных). Для функционирования системы в целом очень существенно, чтобы неготовность одних процессов к приему объектов данных и служебной информации не сказалась на возможности других процессов принимать данные и служебную информацию.

В стандарте MPI не предусмотрена обработка каких-либо ошибочных ситуаций, связанных с передачей данных. предполагается, что все сообщения, которые были отправлены передатчиками, всегда будут доставлены соответствующим приемникам. Используемая сеть должна обеспечивать гарантированную доставку данных.

Таким образом, для реализации MPI в системе требуется поддержка следующих механизмов:

– поддержка механизмов обеспечения качества сервиса, таких как гарантированная доставка данных, гарантированное максимальное время доставки данных;

– возможность управления потоком данных между терминальными узлами источником и приемником;

– поддержка механизмов синхронизации;

– исключение взаимовлияния, взаимоблокировок между различными потоками данных в сети и в терминальных узлах.

## Краткий обзор существующих подходов к реализации MPI

В настоящее время существует довольно большое количество реализаций MPI в сетях на базе Ethernet, Infiniband, Fibre Channel. Многие из них имеют ряд общих черт, но имеются и различия в особенностях реализации.

В сетях на базе Ethernet и Fibre Channel широкое распространение получил подход к реализации MPI на базе механизма сокетов (Berkley Sockets). Этот подход ориентирован прежде всего на использование в сетях, в которых на сетевом (и нижележащих уровнях) отсутствуют механизмы поддержки качества сервиса передачи данных.

Такой же механизм может использоваться и в сетях Infiniband. Однако в этом стандарте существуют развитые механизмы поддержки качества сервиса на транспортном уровне и нижележащих уровнях. Поэтому для данного стандарта большее распространение получили реализации, основанные на этих механизмах – механизмах групп очередей (Qeuing Pair (QP)) транспортного уровня, позволяющих управлять потоками данных и механизмов организации прямого доступа к памяти (RDMA).

## Возможности стандарта SpaceFibre

Рассмотрим, какие из механизмов, необходимых для реализации MPI, уже имеются в стандарте SpaceFibre, а какие требуется модифицировать или реализовать дополнительно.

Стандарт SpaceFibre определяет уровни протокола обмена от физического до сетевого. Предусмотрена возможность использовать различные транспортные протоколы. Транспортные протоколы специфицированы в отдельных стандартах. Набор транспортных протоколов, используемый в сетях SpaceFibre может расширяться [1].

## Поддержка механизмов обеспечения качества сервиса

В стандарте SpaceFibre механизмы QoS поддерживаются на сетевом уровне и на подуровнях виртуальных каналов (Virtual Channels) и повторных передач (Retry) в звене передачи данных.

Данные могут искажаться при передаче через сеть, теряться и не достигать адресата вследствие ошибок, являющихся проявлением сбоев и отказов в сетевом оборудовании и физических каналах передачи данных. Потенциально данные могут отбрасываться в случае возникновения перегрузок отдельных участков в сети, переполнении приемных буферов устройств. На уровне виртуальных каналов в стандарте SpaceFibre поддерживается схема управления потоком – схема кредитования от приемника. Принимающая сторона посылает передающей стороне количество кредитов, соответствующее количеству свободного места в буфере. Передающая сторона отправляет приемной количество данных, не превышающее количество полученных кредитов. Схема кредитования функционирует независимо для каждого виртуального канала. Такая схема кредитования позволяет исключить потери передаваемых данных из-за неготовности принимающей стороны.

Уровень повторных передач обеспечивает гарантированную доставку данных в случае сбоев в физических каналах во время передачи. Данные передаются упакованными в фреймы, каждый из которых снабжается порядковым номером и контрольной суммой (CRC). Наличие порядковых номеров позволяет приемной стороне выявлять потерю фреймов при передаче. Контрольная сумма позволяет приемной стороне выявлять ошибки (искажения слов), входящих в состав фрейма. Приемная сторона информирует передающую сторону об успешном приеме пакетов или о возникших ошибках. (Для этого используются управляющие символы ACK и NACK соответственно.) В случае возникновения ошибки передающая сторона повторно передает соответствующий фрейм данных (и все фреймы, которые уже были переданы после него). Данный механизм позволяет исключить потери и искажения данных в случае сбоев в физических каналах.

Для того чтобы парировать отказы в линиях связи и сетевого оборудования, можно использовать различные методы пространственного резервирования. В стандарте SpaceFibre не специфицированы методы пространственного резервирования. В сочетании с этим стандартом могут использоваться различные методы пространственного резервирования, различная кратность резервирования. Методы и кратность резервирования могут выбираться в соответствии с характеристиками отказов в сети, которые необходимо парировать.

Механизмы QoS обеспечивающие гарантированное максимальное время доставки данных в стандарте SpaceFibre реализованы на уровне виртуальных каналов и на сетевом уровне. Для поддержки этих механизмов в SpaceFibre реализован механизм виртуальных сетей/виртуальных каналов. Для каждого виртуального канала каждого звена передачи данных может быть задан набор параметров, характеризующих требуемое качество сервиса: уровень приоритета, доля пропускной способности, перечень таймслотов, в которые разрешена передача (для реализации механизма планирования). При передаче в физический канал фреймы от разных виртуальных каналов могут чередоваться. После завершения передачи очередного фрейма контроллер доступа к физическому каналу определяет, из какого виртуального канала будет передаваться следующий фрейм. Выбор делается в соответствии с набором параметров, заданных для каждого виртуального канала. Если по какому-то виртуальному каналу передача данных будет приостановлена, заблокирована (например, вследствие того, что приемник не готов к дальнейшему приему данных), то это никак не скажется на передаче данных по остальным виртуальным каналам.

Виртуальная сеть представляет собой совокупность виртуальных каналов. (В каждом звене передачи данных виртуальной сети может соответствовать один виртуальный канал.) В каждом звене передачи данных может поддерживаться до 32 виртуальных каналов. В физической сети может поддерживаться до 64 виртуальных сетей.

Использование данных механизмов QoS (механизма планирования) позволяет обеспечить гарантированное время доставки пакетов данных, передаваемых по разным виртуальным сетям. Однако эти механизмы не могут быть использованы для обеспечения требуемых характеристик разных потоков пакетов, передаваемых в одной виртуальной сети. Таким образом, стандарт SpaceFibre позволяет обеспечить гарантированное время доставки не более чем для 64 потоков данных.

Стандарт SpaceFibre позволяет обеспечить гарантированную доставку данных и гарантированное время доставки данных. Для обеспечения парирования отказов в сочетании со стандартом

SpaceFibre могут использоваться различные методы пространственного резервирования.

Гарантированное время доставки данных может быть обеспечено для 64 потоков пакетов данных. В HPC системе количество приложений, обменивающихся данными может быть существенно выше, поэтому данного количества может быть недостаточно. (Количество независимых потоков данных может составлять несколько сотен.) Соответственно, требуются дополнительные механизмы для увеличения количества поддерживаемых потоков данных. Потенциально они могут быть реализованы на транспортном уровне.

## Поддержка механизмов синхронизации

В стандарте SpaceFibre поддерживается механизм широковещательной рассылки специальных управляющих кодов Broadcast и механизм широковещательной рассылки пакетов данных. Механизм широковещательной рассылки Broadcast обеспечивает строго гарантированное и минимальное время доставки. Однако в сети SpaceFibre может быть не более 256 источников Broadcast. Это может стать существенным ограничением его использования для реализации барьерной синхронизации, в HPC системах, в которых выполняется несколько сот приложений. Для таких систем для реализации барьерной синхронизации может использоваться широковещательная рассылка пакетов данных. Время доставки и джиттер времени доставки пакетов, рассылаемых широковещательно несколько выше, чем соответствующие характеристики для Broadcast. Но при этом количество приложений – источников не ограничено. Возможен комбинированный подход, при котором, для групп приложений, наиболее критичных по времени, может использоваться механизм Broadcast, а для остальных групп приложений – широковещательная рассылка пакетов. Таким образом, стандарт SpaceFibre включает в себя механизмы, необходимые для организации барьерной синхронизации.

## Исключение взаимовлияния, взаимоблокировок между различными потоками данных в сети и в терминальных узлах

Как было показано выше, стандарт SpaceFibre позволяет исключить взаимоблокировки между потоками данных, передающимися по разным виртуальным сетям. Однако поддерживаемое в одной физической сети количество виртуальных сетей равно 64. Такого количества отдельных изолированных потоков недостаточно, для большинства HPC систем. Соответственно, требуются дополнительные механизмы для поддержки большего количества потоков данных. Потенциально, они могут быть реализованы на транспортном уровне.

## Возможность управления потоком данных между терминальным узлом/приложением источником и приемником

Стандарт SpaceFibre определен на уровнях от физического до сетевого, вследствие этого он не содержит механизмов, регламентирующих взаимодействие между терминальными узлами. Эти механизмы определены на уровнях, начиная с транспортного. Анализ предоставляемых ими возможностей приведен в следующем разделе.

Таким образом, для реализации MPI в сетях на базе SpaceFibre необходимо увеличить количество потоков данных для которых могут быть обеспечены характеристики качества сервиса и отсутствие взаимовлияния, возможность управления потоком данных на уровне терминальных узлов/приложений.

## Протоколы транспортного уровня для стандарта SpaceFibre

Стандарт SpaceFibre может использоваться в сочетании с различными протоколами транспортного уровня. Наиболее распространенными являются RMAP, ESDP, СТП_ИСС. Рассмотрим возможность применения этих протоколов для реализации MPI.

***Протокол RMAP***

Предназначен для организации доступа к памяти удаленного терминального узла. С использованием этого протокола приложение может посылать в удаленный терминальный узел команды чтения и записи памяти, а также атомарные команды чтения, модификации, записи. Пакеты RMAP снабжаются контрольными суммами, что позволяет выявлять искажения данных, которые могут происходить в результате сбоев в процессе передачи по сети. Пакеты RMAP снабжаются порядковыми номерами (идентификаторами транзакций), что позволяет выявлять потерю или изменение порядка следования команд через сеть.

Данный протокол является протоколом без установки соединения. Никаких предварительных настроек транспортного уровня перед началом взаимодействия терминальных узлов выполнять не требуется.

Команда включает в себя логический адрес приемника. Это может быть логический адрес терминального узла – приемника в сети или логический адрес может использоваться и для идентификации приложения, имеющего какое-то отношение к текущей команде в терминальном узле. (Терминальному узлу может ставиться в соответствие несколько логических адресов, если в нем выполняется несколько приложений.) В команде указывается адрес обращения к памяти терминального узла и количество байтов данных, которые необходимо прочитать или записать. Команды записи могут быть с предварительной верификацией данных или без нее. Команды записи могут быть с подтверждениями или без них.

Описанные выше механизмы достаточно хорошо подходят для реализации функций put и get.

Функции MPI Send и Receive потенциально можно представить командами записи. Команды являются командами прямого обращения к памяти по адресам. Поэтому для того, чтобы по команде записи была выполнена запись данных в область, выделенную при настройках группы MPI конкретному приложению, необходимо, чтобы приложение – источник команды имело информацию о распределении памяти в терминальном узле приемнике, о его возможных изменениях в процессе работы. В идеологии MPI приложения не должны располагать такой информацией. Для реализации распространения этой информации требуется очень основательная модификация реализации MPI. Само распространение этой информации может быть требует реализации дополнительных механизмов и связано с большими накладными расходами. Другим возможным решением этой проблемы является использование в командах абстрактных/логических адресов, которые при выполнении обращений в память должны преобразовываться в физические адреса обращения блоком управления обращениями в память (Memory Management Unit MMU). Также нужны механизмы отслеживания, готова ли соответствующая область памяти и приему очередного объекта данных (завершена ли обработка предыдущего объекта данных в этой области).

Необходимо отметить, что блок MMU с требуемой для выполнения этих действий функциональностью имеется не во всех системах. Если он есть, то не всегда контролер транспортного уровня имеет на него прямой выход. Поэтому данный подход может быть или не применим, или связан с очень большими накладными расходами.

Для реализации разделения потоков данных, адресованных разным приложениям потенциально может быть использован логический адрес приемника. Он может позволить реализовать механизмы переупорядочивания выполнения команд записи, адресованных разным приложениям в случае, если области памяти, выделенные ряду приложений не готовы к приему очередных данных.

Никаких средств управления порядком отправки команд от разных приложений в терминальном узле источнике в данном протоколе не предусмотрено. Нет в этом протоколе и средств управления потоком, информирования источника о состоянии приемника.

Таким образом, данный протокол не подходит для реализации многих функций MPI.

***Протокол ESDP***

Предназначен для потоковой передачи данных. Источниками данных могут являться различные датчики, видеокамеры. При использовании этого протокола предполагается, что существует некоторый период – интервал времени между последовательными передачами данных между источником и приемником. Этот интервал должен быть достаточен для обработки предыдущего объекта данных. (В противном случае, если приемное устройство будет систематически не готово к обработке очередного объекта данных, то очередь из необработанных объектов данных будет постоянно накапливаться. Система не будет находиться в стационарном режиме.) Вследствие этого данный протокол обладает упрощенной схемой управления потоком, не достаточной для реализации MPI.

В данном протоколе не предусмотрено указания адреса обращения в передаваемом пакете, поэтому все действия по определению места в памяти, в которое следует поместить данные, выполняются на приемной стороне в соответствии с идеологией MPI.

Протокол является протоколом с установкой соединения. Идентификатор соединения может быть использован для разделения потоков данных (исключения взаимовлияния потоков данных), относящихся к разным приложениям. В одном терминальном узле может быть установлено до 2048 транспортных соединений. Этого достаточно для большинства современных HPC систем. Каких-либо специальных механизмов управления потоками, управления очередностью приема и отправки пакетов в протоколе не предусмотрено, однако, наличие идентификаторов соединений позволяет реализовывать такого рода механизмы.

Протокол не включает в себя механизмов для реализации функций Put и Get.

Таким образом, ESDP не вполне подходит для реализации MPI. Основным ограничением является отсутствие возможности управления потоком.

***Протокол СТП-ИСС***

Обеспечивает возможность передачи объектов данных как с установкой транспортного соединения, так и без него. Идентификация транспортного соединения может быть использована для реализации разделения потоков данных. Однако поддерживается до 8 транспортных соединений, что может быть недостаточно для многих современных HPC систем. Поддерживается три типа пакетов для передачи данных – пакеты команд, пакеты срочных сообщений и пакеты обычных сообщений. Для этих трех типов в протоколе предусмотрены механизмы планирования при передаче через сеть, обеспечивающие изоляцию потоков данных. Однако длина поля данных в пакетах-командах ограничена 4 байтами, что может стать существенным ограничением при использовании этого типа пакетов для реализации MPI. Двух изолированных потоков недостаточно для реализации терминальных узлов современных HPC систем.

В данном протоколе, так же как и в ESDP, не указывается адрес обращения. Соответственно, все действия по размещению принятых данных в памяти на приемной стороне осуществляются в соответствии с MPI. В СТП-ИСС нет средств управления потоком.

В СТП-ИСС нет механизмов для реализации функций Put и Get.

Таким образом, СТП-ИСС, как и два рассмотренных ранее протокола, не является подходящим для реализации MPI. Основными ограничениями являются отсутствие возможности управления потоком и существенные ограничения по количеству потоков данных, взаимовлияние которых может быть исключено на уровне терминальных узлов.

В этом разделе показано, что ни один из протоколов транспортного уровня, разработанных для стандарта SpaceFibre не подходит для реализации механизмов MPI.

## Предлагаемый протокол транспортного уровня для реализации механизмов MPI в сетях SpaceFibre

Набор функций, реализуемых на транспортном уровне, правила обмена пакетами, формат пакетов транспортного уровня должны обеспечивать дополнительную функциональность, необходимую для реализации MPI в стандарте SpaceFibre. Собственно, функции MPI являются функциями прикладного уровня. Не исключено, что часть из них может быть целесообразно с точки зрения реализаций в той или иной форме реализовать/учесть в транспортном протоколе. Однако это является предметом дальнейших исследований.

Эта версия протокола обеспечивает только набор действий, необходимый для обмена данным. Не обеспечивается набор служебных действий по созданию, закрытию коммуникаторов. Необходимость их реализации в протоколе транспортного уровня является предметом дальнейших исследований.

Как было показано в предыдущих разделах, протокол транспортного уровня должен обеспечивать поддержку количества потоков данных, для которых могут быть обеспечены характеристики качества сервиса и отсутствие взаимовлияния соответствующее количеству потоков в современных HPC системах на базе MPI, возможность управления потоком данных на уровне терминальных узлов/приложений.

При использовании MPI взаимодействие процессов осуществляется в рамках группы, в которой каждый процесс может взаимодействовать с каждым. Каждая группа идентифицируется своим идентификатором – коммуникатором. Каждый процесс в группе имеет свой уникальный порядковый номер – ранг. Соответственно, каждый независимый поток данных может быть идентифицирован коммуникатором, рангом процесса отправителя и рангом процесса получателя. Для того чтобы можно было обеспечивать разным потокам разные характеристики QoS, исключение блокировок одних потоков из-за неготовности других, необходимо, чтобы потоки на транспортном уровне были различимы. В соответствии с этим заголовок транспортного уровня должен содержать поля номера группы (коммуникатор), номера (ранга) процесса – отправителя и номера (ранга) процесса – получателя в группе.

Включение в заголовок транспортного уровня этих полей позволяет обеспечить возможность исключения блокировок одних потоков данных другими в случае неготовности отдельных приложений к приему очередных данных.

Однако количество приложений, групп в различных системах может варьироваться в очень широких пределах. Если выбирать размеры этих полей в соответствии с максимальными значениями, определенными в MPI, это может привести к тому, что заголовок будет

иметь очень большую длину, что будет связано с большими накладными расходами при передаче. Поэтому предлагается сделать разрядность этих полей параметризуемой, в соответствии с диапазоном значений, необходимым для каждой конкретной системы. Таким образом, в системе становится возможным обеспечить изолированную обработку/передачи такого количества потоков данных, которое необходимо для конкретной системы, что являлось одной из основных проблем при реализации MPI в сетях SpaceFibre.

Поскольку на транспортном уровне нет необходимости обрабатывать отдельные элементы объекта данных, в транспортном заголовке нет указания количества элементов и размера одного элемента.

Для реализации функций Put и Get в протоколе используются команды чтения и записи памяти удаленного узла. В отличие от сходных по своему назначению команд протокола RMAP, в них используются не абсолютные, а относительные значения адресов, которые интерпретируются в соответствии со значениями полей, содержащих ранг источника и приемника и номер коммуникатора. Это позволяет на удаленной стороне интерпретировать адрес обращения с учетом распределения своего адресного пространства.

Для реализации функции Send в протоколе используется команда передачи, которая интерпретируется на приемной стороне также с учетом ранга источника и приемника и номера коммуникатора. В команде предусмотрено поле tag, необходимое для дополнительной идентификации в приемнике команды. Кроме того, используется дополнительное поле для идентификации типа команды Send.

В протоколе предусмотрено несколько типов служебных сообщений – подтверждения об успешном и неуспешном выполнении команд и оповещение о статусе приемнике.

Поскольку суммарное количество команд довольно велико и, соответственно, полный вариант заголовка протокола может оказаться очень длинным, что связано с большими накладными расходами при передаче, предусмотрена возможность профилирования протокола для конкретной реализации с учетом планируемой функциональности. В заголовок включаются только те поля, которые планируется использовать в данной реализации (и осуществляется поддержка только необходимой функциональности). Это позволяет исключить лишние (заведомо неиспользуемые накладные расходы на реализацию).

Таким образом, предложенный протокол позволяет решить основные проблемы, возникающие при реализации MPI в сети SpaceFibre.

## Реализация контроллера сетевого интерфейса с поддержкой механизмов MPI

Для оценки характеристик была выполнена реализация контроллера предложенного протокола. Был выбран аппаратно-программный вариант реализации, поскольку он обеспечивает широкие возможности по реконфигурации, в том числе и динамической. Возможность реконфигурирования реализации в данном случае является важным свойством.

Во-первых, она позволяет адаптировать контроллер в соответствии с различными вариантами формата заголовка пакета, что важно для протокола с реконфигурируемым форматом заголовка.

Во-вторых, она позволяет адаптировать контроллер к параметрам и характеристикам, зависящие от конкретной системы, например, количеству обрабатываемых потоков данных. Соответственно, эта черта является полезной и на этапе эксплуатации / при применении контроллера в реальных сетях.

В-третьих, она позволяет иметь возможность корректировать реализацию протокола по результатам моделирования и запланированных далее исследований. Такая возможность является очень полезной в процессе разработки схемы обмена, поскольку этот процесс, как правило, носит итеративный характер.

Как было показано в предыдущих исследованиях, полностью программные реализации контроллеров на RISC ядрах не могут обеспечить требуемую пропускную способность, скорость обработки входного потока данных при функционировании на частоте, соответствующей скорости поступления данных. (Для многих применений частота функционирования контроллеров сетевых интерфейсов строго ограничена из-за ограничений по энергопотреблению и/или теплоотводу.) Скорость обработки данных полностью программно в 10–20 раз медленнее, чем при использовании специализированной реализации на базе конечных автоматов, функционирующей на той же частоте. Для того чтобы увеличить пропускную способность, ускорить процесс обработки данных в ряде современных RISC архитектур существует возможность дополнять процессорное ядро различными специализированными вычислителями. Например, это может быть сдела-

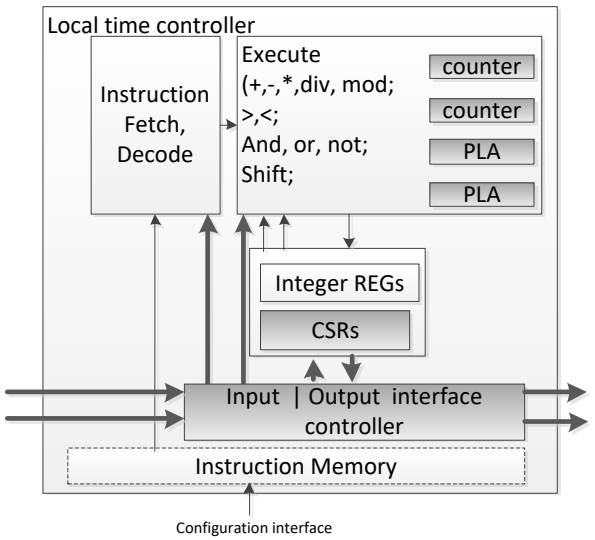



*Рис. 1. Структурная схема модифицированного процессорного ядра с архитектурой RISC-V*

но в архитектурах ARC, Xtensa, RISC-V. Для реализации была выбрана архитектура RISC V, поскольку ее спецификация является полностью открытой, использование не требует лицензирования.

Вследствие этого наш вариант реализации основан на процессорном ядре с архитектурой RISC-V (рис. 1). Для определения действий, которые целесообразно реализовать аппаратно, были проанализированы алгоритмы обработки данных в ходе их приема и передачи в соответствии с возможными реализациями основных функций MPI. В соответствии с этим аппаратно были реализованы функции вычисления CRC, счетчики, используемые для счета таймаутов и счета количества слов (принимаемых, передаваемых), вычислители комплексных условий (функциональные модули со структурой программируемых логических матриц), автоматы – контроллеры прямого доступа к памяти и автоматы – контроллеры потоковых интерфейсов с сетевым уровнем. Были добавлены специализированные регистры (control special registers – CSR), необходимые для управления этими блоками.

Была выполнена оценка аппаратных затрат на реализацию по технологии ASIC, с использованием проектных норм 180–45 нм. Синтез был выполнен с использованием САПР Cadence Genus.

Аппаратные затраты на реализацию не превосходят аппаратные затраты на реализацию протоколов RMAP [14], ESDP [15], [16] и СТП_ИСС [17] в виде конечных автоматов. Выполнены оценки достижимых характеристик времени доставки данных. Показано, что задержка передачи данных не превосходит 15 % задержки, определяемой физической скоростью передачи данных по сети. Джиттер задержки не превосходит 5 %.

## Заключение

В статье рассмотрены основные механизмы MPI. Показано, что стандарт SpaceFibre включает в себя многие механизмы, необходимые для реализации MPI. Однако часть необходимых механизмов в нем отсутствует.

Для устранения этого ограничения в статье предлагается протокол транспортного уровня с возможностью динамической реконфигурации для реализации MPI в сетях SpaceFibre. Предложен вариант реализации протокола на базе процессорного ядра с архитектурой RISC-V. Выполнена оценка характеристик. Показано, что аппаратные затраты сравнимы с аппаратными затратами рассмотренных в статье протоколов транспортного уровня для сети SpaceFibre. Достижимые временные характеристики обмена данными так же имеют приемлемые значения.

В дальнейших планируется выполнить сравнение характеристик с известными реализациями MPI в сетях на базе Ethernet и Infiniband.

### Библиографический список

1. SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C // ESA-ESTEC. Noordwijk, The Netherlands. 2019. 233 p.

2. *Zulkifli N., Sapit A., Mohammed A.* Development of small scale cluster computer for numerical analysis. CFDRI 2017, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 243. 2017. 6 p.

3. Performance of the OpenMP and MPI implementations on ultrasparc system / A. Bogdanov, P. Sone, K. Ko, K. Zaya. Computer Research and Modeling. 2015. Vol. 7. N 3. P. 485–491.

4. *Balaji P.* Toward E□cient Support for Multithreaded MPI Communication. Proceedings of the 15th European PVM/MPI Users' Group Meeting on Recent Advances in Parallel Virtual Machine and Message Passing Interface. 2008. P. 120–129.

5. *Richard L.* Open MPI: A flexible high performance MPI. PPAM 2005: Parallel Processing and Applied Mathematics. 2005. P. 228–239.

6. *Gerofi B., Ishikawa Y.* Operating Systems for Supercomputers and High Performance Computing. Springer. 2019. 399 p.

7. *Evans N., Ciesko J.* Implementing Flexible Threading Support in Open MPI. Workshop on Exascale MPI (ExaMPI). 2020. 10 p.

8. *Bernholdt D., Boehm S.* A survey of MPI usage in the U. S. Exascale Computing Project. Concurrency and Computation Practice and Experience 32 (3) 2018. 20 p.

9. *Goglin B.* High-Performance Message Passing over generic Ethernet Hardware with Open-MX. Parallel Computing, Elsevier. 2011, 37 (2). P. 85–100.

10. *Ong H., Farrell P.* Performance Comparison of LAM/MPI, MPICH, and MVICH on a Linux Cluster connected by a Gigabit Ethernet Network. 4th Annual Linux Showcase Conference. 2000. 11 p.

11. *Subramoni H., Hamidouche K.* MPI Library with Dynamic Connected Transport (DCT) of InfiniBand: Early Experiences. Supercomputing. Vol. 8488 of Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing. 2014. P. 278–295.

12. *Subramoni H., Augustine A.* INAM2: InfiniBand Network Analysis and Monitoring with MPI. ISC. 2016. 19 p.

13. URL: https://www.mpi-forum.org/docs/mpi-4.0/mpi40-report.pdf (дата обращения: 15.12.2020).

14. ECSS-E-ST-50-52C SpaceWire – Remote memory access protocol, 2010.

15. Streaming Transport Protocols for SpaceWire Networks / Y. Sheynin, E. Suvorova, F. Schutenko, V. Goussev // International SpaceWire Conference, 2010.

16. Real Time Video Data Transmission in SpaceFibre Networks with the ESDP Transport Protocol / A. Khakhulin, I. Orlovsky, Y. Sheynin, E. Suvorova // SpaceWire Conference, 2016.

17. STP-ISS Transport Protocol for SpaceWire On-Board Networks: Development and Evolution / V. Olenev, I. Lavrovskaya, Y. Sheynin, I. Korobkov // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems. N 5 (4). IGI Global. 2014. P. 45–76.

**УДК 621.391** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-253**

***Ф. А. Таубин****
*доктор технических наук, профессор*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ПЕРЕДАЧА С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ В КАНАЛАХ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ

*Рассматривается передача в канале с линейными искажениями с использованием класса передающих сигналов, допускающих контролируемую (заданную) глубину межсимвольной интерференции на входе решающего устройства и позволяющих улучшить обменные соотношения между скоростью передачи и помехоустойчивостью.*
***Ключевые слова:*** *канал с линейными искажениями, контролируемая межсимвольная интерференция, минимальное расстояние, линейный дифференциальный оператор, наименьшее сингулярное число.*

***F. A. Taubin****
*Dr. Sc. Tech., Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# TRANSMISSIN WITH CONTROLLED INTERFERENCE ON LINEAR DISTORTION CHANNELS

*Digital transmission over linear distortion channels is considered. The signaling scheme using a class of signals that allow a controlled intersymbol interference and provide an improvement in the tradeoffs between the transmission rate and error rate bi proposed.*
***Keywords:*** *linear distortion channel, controlled intersymbol interference, minimum distance, linear differential operator, the smallest singular value.*

## Введение

Отличительной особенностью реальных каналов передачи данных является жесткое ограничение рабочей полосы частот фильтрами минимально-фазового типа, вызывающими при передаче сигналов существенные линейные искажения, и, в частности, межсимвольную интерференцию (МСИ). Традиционный подход к выбору сигналов для каналов с искажениями, позволяющий исключить МСИ, состоит в следующем [1], [2]. Передающий фильтр (собственно, и формирующий передаваемый сигнал) выбирается таким образом, чтобы три последовательно включенных фильтра – передающий фильтр, канальный фильтр и приемный фильтр, были эквивалентны, в совокупности, идеальному фильтру нижних частот (либо фильтру с модулем частотной характеристики в виде «поднятого косинуса»). Из этого условия следует, что модуль частотной характеристики (лучшего в определенном смысле) передающего фильтра $T(\cdot)$ имеет вид:

$$\left|T(f)\right| = \sqrt{P(f)/\left|H(f)\right|}, \quad -\infty < f < \infty, \qquad (1)$$

где $P(\cdot)$ – частотная характеристика целевого фильтра нижних частот, $H(\cdot)$ – частотная характеристика канального фильтра. Однако традиционный подход имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, отсутствуют четкие критерии выбора полосы пропускания целевого идеального фильтра нижних частот. Во-вторых, для реальных каналов передающий фильтр, определяемый согласно (1), оказывается физически нереализуемым, поэтому приходится использовать физически реализуемые аппроксимации правой части (1), что приводит к появлению МСИ. В-третьих, даже если бы такой фильтр удалось физически реализовать, в силу медленного убывания импульсной характеристики целевого фильтра нижних частот даже незначительный джиттер приводит к появлению существенной МСИ. Таким образом, условие физической реализуемости передающего фильтра с частотной характеристикой вида (1) означает появление МСИ, модель которой весьма сложным образом зависит от выбранного варианта физически реализуемой аппроксимации частотной характеристики (1),

что в свою очередь затрудняет анализ помехоустойчивости при использовании такого передающих сигналов.

Указанные обстоятельства диктуют необходимость модификации традиционного подхода разработки более эффективных методов передачи в каналах с линейными искажениями [3]–[5]. Один из таких модифицированных подходов представлен в работе [6], где приведено описание класса физически реализуемых сигналов, позволяющих исключить МСИ для широкого ряда каналов с линейными искажениями, а также получены обменные соотношения между скоростью передачи и помехоустойчивостью. В данной рассматривается более широкий класс передающих сигналов, а именно сигналов, допускающих контролируемую (заданную) глубину межсимвольной интерференции и, благодаря этому, позволяющих улучшить обменные соотношения между скоростью передачи и помехоустойчивостью.

## Модель передачи

Двоичная информационная последовательность **a** разбивается на $m$-блоки $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_i = (a_{i1},\ldots,a_{im})$, и с помощью отображения $\mathbf{F}_2^m \to \mathbb{C}$ преобразуется в последовательность канальных символов $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2,\ldots)$; канальные символы представляют собой комплексные величины, $b_j \in \mathbb{C}$, принимающие значения из $2^m$-точечного сигнального множества (созвездия) $B$, $B \subset \mathbb{C}^N$. Последовательность канальных символов $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2,\ldots)$ с тактовой частотой 1/T передается по каналу посредством линейной модуляции сигналов с частичным откликом (partial response signaling), то есть комплексная огибающая $u(\cdot)$ суммарного передаваемого сигнала имеет вид:

$$u(t) = \sqrt{2mE_b / \sigma^2} \sum_{j\ge 0} b_j\, a(t - jT)\,, \quad t \ge 0,$$

где $a(\cdot)$ – модулирующая функция, $\int_0^T a^2(t)dt = 1$, $E_b$ – энергия, затрачиваемая на передачу одного бита, $\sigma^2$ – среднее значение квадрата евклидовой нормы канальных символов $b_j$,

$$\sigma^2 = \overline{|b_j|^2}\,; \qquad (2)$$

$|\cdot|$ в (2) означает евклидову норму, черта сверху – усреднение по распределению на сигнальном множестве $B$, индуцированному распределением информационных $m$-блоков.

Основными количественными характеристиками пары $(B, a(\cdot))$ являются а) коэффициент использования полосы частот $\gamma = \upsilon/W$, где $\upsilon = m/T$ – скорость передачи, $W$ – полоса частот, занимаемая модулирующей функцией $a(\cdot)$, и б) минимальное евклидово расстояние $\sqrt{mE_b}\Delta_B / \sigma$, где $\Delta_B$ – минимальное евклидово в сигнальном созвездии $B$. Будем полагать, что передача ведется по линейному стационарному каналу с симметричной относительно несущей частоты передаточной характеристикой; низкочастотный эквивалент (комплексная огибающая) $h(\cdot)$ импульсной характеристики такого канала является вещественной функцией. Сигнал $r(\cdot)$ на выходе канала (в отсутствии шума) имеет вид:

$$r(t) = \sqrt{2mE_b / \sigma^2} \sum_{j\ge 0} b_j\, g(t - jT) + n(t), \quad t \ge 0,$$

где $g(\cdot)$ – свертка модулирующая функции $a(\cdot)$ и импульсной характеристики $h(\cdot)$, $n(\cdot)$ – комплексный аддитивный белый гауссов шум со спектральной плотностью $N_0$. Очевидно, влияние линейных искажений, вносимых каналом, выражается в замене модулирующей функции $a(\cdot)$ ее реакцией $g(\cdot)$ на выходе канала. Иначе говоря, исходная пара $(B, a(\cdot))$ трансформируется на выходе канала в пару $(B, g(\cdot))$ с минимальным евклидовым расстоянием

$$\delta = \min_{\substack{\mathbf{b},\hat{\mathbf{b}} \\ \mathbf{b}\ne\hat{\mathbf{b}}}} \left( \frac{mE_b}{\sigma^2} \int_0^\infty \left| \sum_{j\ge 0} \left(b_j - \hat{b}_j\right) g\left(t - jT\right) \right|^2 dt \right)^{1/2}. \qquad (3)$$

Принятый сигнал обрабатывается когерентным демодулятором, который формирует последовательность отсчетов $\mathbf{r} = (r_0, r_1, r_2,\ldots)$, следующих с тактовой частотой 1/T и имеющих вид:

$$r_j = \int_0^\infty r(t)\, p(t - jT)\, dt = 0\,, \quad j \ge 0,$$

где $p(\cdot)$ – демодулирующая функция, такая что совокупность всех ее временных сдвигов, кратных $T$, образует базис в линейном пространстве, натянутом на совокупность всех временных сдвигов функции $g(\cdot)$. Последовательность **r** поступает в приемник, который формирует оценку $\hat{\mathbf{a}}$ переданной информационной последовательности. При вынесении решения по максимуму правдоподобия (МП) главный член вероятности ошибки декодирования есть, очевидно, $O\left(\exp\left(-\delta^2/4N_0\right)\right)$, и в этом смысле приемник МП реализует расстояние $\delta$.

## Модулирующая функция с контролируемой интерференцией

Введем семейство функций $\{h_t(\cdot) \mid t \geq T_0\}$, $T_0 \geq T$, вида:

$$h_t(\tau) = \begin{cases} h(t-\tau), & \tau \in [0, T_0], \\ 0, & \tau \notin [0, T_0]; \end{cases}$$

и пусть $X$ есть линейное подпространство, натянутое на совокупность функций $\{h_t(\cdot) \mid t \geq T_0\}$. Ортогональное дополнение подпространства $X$ в пространстве $L^2(0, T_0)$ обозначим через $F$. Очевидно, для всякого элемента $f(\cdot)$, принадлежащего подпространству $F$,

$$\int_0^T h(t-\tau) f(\tau) d\tau = 0, \quad t \geq T,$$

то есть при использовании любого элемента из $F$ в качестве модулирующей функции $a(\cdot)$ в канале появляется контролируемая интерференция, глубина которой $K = \lceil T_0/T \rceil - 1$.

Для описания структуры подпространства $F$ в явном виде введем следующие обозначения: обозначим через $H$ интегральный оператор в $L^2(0, T_0)$ с ядром $h(\cdot, \cdot)$ вида $h(t, \tau) = h(t-\tau)$, $0 \leq \tau \leq t \leq T_0$; пусть $H_F$ есть сужение оператора $H$ на подпространство $F$ и пусть $E$ представляет собой $H$-образ подпространства $F$. Тогда с использованием техники, представленной в [6], можно показать, что для любого канала, передаточная характеристика которого есть дробно-рациональная функция, оператор $H_F^{-1}$, обратный к оператору $H_F$, может быть представлен в виде

$$H_F^{-1} = \sum_{i \geq 0} \lambda_i \varphi_i \psi_i,$$

где $\{\lambda_i\}$ – сингулярные числа оператора $H_F^{-1}$, $\{\varphi_i\}$ и $\{\psi_i\}$ – ортонормированные полные (в подпространстве $F$ и пространстве $L^2(0, T_0)$, соответственно) системы функций, такие что $\psi_i$ – собственная функция оператора $\left(H_F^{-1}\right)^* H_F^{-1}$, соответствующая собственному числу $\lambda_i^2$, и $\varphi_i = \lambda_i^{-1} H_F^{-1} \psi_i$.

Пусть сингулярные числа $\lambda_i$, $i = 1,2,...$, упорядочены в неубывающем порядке. Выберем компоненты модулирующей $a(\cdot)$ и демодулирующей $p(\cdot)$ функций следующим образом $a(\cdot) = \varphi_1(\cdot)$, $p(\cdot) = \psi_1(\cdot)$. Тогда отсчеты $r_j$ на выходе демодулятора имеют вид:

$$r_j = \sqrt{2mE_b/\lambda_1^2\sigma^2} \sum_{l=-K}^{K} \rho_l b_{j-l} + n_j, \quad j \geq 0,$$

где $\lambda_1$ – наименьшее сингулярное число оператора $H_F^{-1}$, $\rho_l = \int_0^{T_0} \psi_1(t)\psi_1(t-lT)dt$, $\{n_j\}$ – комплексные гауссовские величины с нулевым средним и взаимной корреляцией $n_j n_{j-l} = \rho_l N_0$. В приемнике обеляющий фильтр преобразует последовательность отсчетов $\mathbf{r} = (r_0, r_1, r_2, \ldots)$ в последовательность $\mathbf{v} = (v_0, v_1, v_2, \ldots)$ вида:

$$v_j = \sum_{l=0}^{K} \beta_l b_{j-l} + \eta_j, \tag{4}$$

где $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_K$ – коэффициенты полинома $G(z) = \sum_{s=0}^{K} \beta_s z^s$, такого что

$$G(z)G^*(z^{-1}) = \sum_{l=-K}^{K} \rho_l z^{-l}, \tag{5}$$

$\{\eta_j\}$ – некоррелированные комплексные гауссовские величины с нулевым средним и дисперсией $N_0$. Последовательность $\mathbf{v}$ поступает в детектор, который выносит МП-решение $\hat{\mathbf{a}}$ относительно переданной информационной последовательности. С учетом (4) выражение (3) для минимального расстояния $\delta$ приобретает следующий вид:

$$\delta = \min_{\substack{\mathbf{b}, \hat{\mathbf{b}} \\ \mathbf{b} \neq \hat{\mathbf{b}}}} \left( \frac{mE_b}{\lambda_1^2\sigma^2} \sum_{j \geq 0} \left| \sum_{l=0}^{K} \beta_l \left( b_{j-l} - \hat{b}_{j-l} \right) \right|^2 \right)^{1/2}. \tag{6}$$

Исчерпывающий анализ дистанционных характеристик при введении контролируемой интерференции весьма затруднен в силу сложности вычисления минимального расстояния $\delta$. Можно привести лишь качественные соображения относительно выбора глубины контролируемой интерференции $K$ (то есть длительности $T_0$ модулирующей функции $a(\cdot)$). С одной стороны, с увеличением глубины контролируемой интерференции значение внешней суммы в (), как правило, убывает. Однако с увеличением длительности $T_0$ уменьшается и наименьшее сингулярное число $\lambda_1$, поэтому существует оптимальная длительность $T_0$, обеспечивающая максимизацию минимального расстояния $\delta$ (в рамках рассматриваемой модели передачи). Ограничимся далее рассмотрением частного случая, когда глубина контролируемой интерференции $K$=1, то есть $T \leq T_0 \leq 2T$. Можно показать, что при $K$=1 минимум в правой части (6) достигается на парах канальных последовательностей, отличающихся в одном символе. Это означает, что с учетом (4) и (5), что минимальное расстояние

$$\delta = \frac{\sqrt{mE_b}\Delta_B}{\lambda_1 \sigma}, \qquad (7)$$

то есть влияние канального фильтра при $K$=1 (и, очевидно, при $K$=0) на минимальное расстояние сводится к появлению множителя $\lambda_1^{-1}$.

Рассмотрим в качестве примера передачу по каналу, низкочастотный эквивалент передаточной характеристики которого описывается фильтром Баттерворта первого порядка с частотой среза $W$/2 Гц. В этом случае импульсная характеристика $h$ (·) имеет вид:

$$h(\tau) = \pi W \exp\left(-\pi W \tau\right), \quad \tau \geq 0. \qquad (8)$$

Оператор $H_F^{-1}$, соответствующий импульсной характеристике (8), представляет собой дифференциальный оператор первого порядка, заданный на множестве всех абсолютно непрерывных функций на интервале $[0, T_0]$ с нулевыми граничными условиями [7]. Наименьшее сингулярное число этого дифференциального оператора $\lambda_1 = \left(1 + \left(1/WT_0\right)^2\right)^{1/2}$; этому сингулярному числу соответствуют модулирующая функция

$$a(t) = \sqrt{2/T_0}\ \frac{WT_0}{\sqrt{1+W^2T_0^2}}\left(-\frac{1}{WT_0}\mathrm{Cos}\frac{\pi t}{T_0} + \mathrm{Sin}\frac{\pi t}{T_0}\right),$$
$$t \in [0, T_0]$$

и демодулирующая функция

$$p(t) = \sqrt{2/T_0}\ \mathrm{Sin}\frac{\pi t}{T_0},\ t \in [0, T_0].$$

Очевидно, что при условии $K$=1 наименьшее значение числа $\lambda_1$ достигается при $T_0 = 2T$. Подставляя это наименьшее значение в (7), получаем

$$\delta = \frac{\sqrt{mE_b}\Delta_B}{\left(1 + \left(1/2WT\right)^2\right)^{1/2}\sigma}.$$

Принимая во внимание, что при $T_0 = T$ (то есть при исключении МСИ) $\lambda_1 = \left(1 + \left(1/WT\right)^2\right)^{1/2}$, можно сделать следующий вывод. Использование сигналов с глубиной контролируемой интерференции $K$=1 в канале с фильтром вида (8) позволяет увеличить скорость передачи вдвое (по сравнению со сценарием отсутствия МСИ) при сохранении того же самого минимального расстояния.

**Библиографический список**

1. *Proakis J., Salehi M.* Fundamentals of Communication Systems. Pearson Prentice Hall, 2005. 858 p.

2. *Proakis J., Salehi M.* Communication Systems Engineering. Prentice Hall, 2002. 801 p.

3. *Gao W.* Energy and Bandwidth-Efficient Wireless Transmission. Springer International Publishing Switzerland, 2017. 485 p.

4. *Anderson J., Rusek F., Owall V.* Faster-Than-Nyquist Signaling // Proceedings of the IEEE. 2013. Vol. 101. N 8. P. 1817–1830.

5. *Prodaniuc C., Stojanovic N., Karinou F.* Partial response signaling for improved chromatic dispersion tolerance in intensity modulation optical transmissions // Optics Express. 2018. Vol. 26. N 3. P. 3013–3019.

6. *Таубин Ф. А.* Решетчатые сигнально-кодовые конструкции для каналов с линейными искажениями // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 66–78.

7. *Наймарк М. А.* Линейные дифференциальные операторы. 2-е изд. М.: Наука, 1969. С. 528.

**УДК 004.021** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-257**

***Н. А. Шехунова****
*кандидат технических наук, профессор*
***М. Русселе*****
*магистрант*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*
***Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Французский высший институт аэронавтики и космоса*

# ИНСТРУМЕНТ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ИОНОСФЕРЫ – МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ

*Представлена модель, описывающая весь процесс распространения электромагнитных волн в моделируемой ионосфере. Описывается алгоритм триангуляции для создания организованной сетки на нерегулярной и неструктурированной сетке, и метод взвешенной интерполяции наименьших квадратов (в зависимости от локальной характеристической плотности сетки). Кроме того, представлен метод Рунге-Кутта 4–5 с адаптационным шагом, который используется для интегрирования уравнений физической модели.*
***Ключевые слова:*** *электромагнитная волна, плазма, численное интегрирование, интерполяция, триангуляция.*

***N. A. Shekhunova****
*PhD Sc. Tech., Professor*
***M. Rousselet****
*Postgraduate Student*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*
***St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, French Superior Institute of Aeronautics and Space*

# RAY TRACING TOOL FOR IONOSPHERE – MODEL AND IMPLEMENTATION

*The whole conception process for electromagnetic wave propagation in a modeled ionosphere is presented. We explain a triangulation algorithm to generate an organized mesh on an irregular and unstructured grid, then a weighted least-square interpolation method (depending on the local characteristic density of the mesh). Finally, a Runge-Kutta 4–5 method with adaptive step is used for integration of physic model's equations.*
***Keywords:*** *electromagnetic wave, plasma, numerical integration, interpolation, triangulation.*

## Введение

Для улучшения прогнозирования магнитного поля Земли, требовалось разработать и внедрить механизм трассировки лучей, моделирующий распространение электромагнитных волн (EW) в моделируемой ионосфере. Распространение ЭВ в плазме нетривиально, поскольку оптический индекс ($n$) зависит от плотности электронов ($n_e$) и магнитного поля ($B_{mag}$), которые являются двумя параметрами, зависящими от пространства и времени в такой среде.

На основе смоделированной ионосферы получены значения электрической плотности и магнитного поля вдоль силовых линий магнитного поля, которые, возможно, смогут перемещаться во времени [1]. Таким образом, результирующая информация представляет собой вычисленные величины на нерегулярном облаке точек. Для реализации такой задачи разделим ее на несколько подзадач:

Структурирование сетки для упрощения процесса интерполяции.

Интерполяция необходимых физических величин,

Решение уравнений распространения (положение луча $r$, направление луча $e_s$, криволинейная абсцисса $s$, частота $f$) (1.1–1.3).

$$\overrightarrow{grad}\vec{n} = \frac{d}{ds}(n\vec{e_s}); \quad (1.1)$$

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = \vec{e_s}; \quad (1.2)$$

$$n = n(n_e(\vec{r})), f, B_{mag}(\vec{r}, \vec{e_s})). \quad (1.3)$$

Мы показываем выбранные методы и пример стандартного вывода, физический анализ является предметом другой будущей статьи.

## Триангуляция

Чтобы обеспечить структурированную сетку, в которой мы могли бы легко определить положение луча, мы выбрали итеративный алгоритм триангуляции Делоне (Борис Николаевич Делоне). Он основан на выводе разбиения выпуклой оболочки на максимальные симплексы [1]. Определив вычисленную структуру с $m$ точками, структура $m$+1 вычисляется следующим образом: мы находим симплекс (в 3-мерном пространстве это тетраэдр), где лежит $m$+1-я точка. Затем мы идентифицируем и удаляем все симплексы, для которых новая точка находится внутри описанной гиперсферы (создавая пустой выпуклый многогранник). Наконец, мы соединяем новую точку с каждой вершиной созданного многогранника. На рис. 1 представлен алгоритм Делоне.

Достоинство алгоритма заключается в том, чтобы оставаться устойчивым в любом измерении. Количество удаленных симплексов во время добавления шага теоретически ограничено, независимо от количества уже добавленных точек. Мы можем предположить, что этот шаг вычисляется за постоянное время $O(1)$. С помощью эффективного алгоритма определения местоположения (стохастическое блуждание) мы пересекаем все симплексы, пересекающие прямую между заданной начальной позицией и $m$+1 точкой. Это число симплексов в 3-мерном пространстве в среднем ограничено числом $O(m^{1/3})$, что приводит к средней временной сложности $O(N^2)$ для всего алгоритма триангуляции, где $N$ – количество точек в облаке [2].

## Интерполяция

Для хорошего алгоритма распространения метод интерполяции должен предоставлять интерполируемую величину и ее градиент в виде непрерывных дифференцируемых функций. Разрывы в градиенте оптического индекса, приводящие к появлению нежелательных острых точек на пути луча. Поэтому метод интерполяции должен быть взвешен дифференцируемой и убывающей функцией $w$ расстояния до точки интерполяции.

Но используемая характерная длина может сильно варьироваться в сетке. Поэтому весовая функция $w$ должна зависеть от локальной плотности точек в сетке. Опираясь на эвристический метод, касающийся нескольких различных вариантов, мы выбрали одну из следующих форм (1.4), где σ – средний размер ближайших симплексов:

$$w(\overrightarrow{x_i}) = e^{-\frac{(x_i-p)^2}{\sigma^2(p)}}. \qquad (1.4)$$

Таким образом, рассматривая только точки сетки, для которых весовая функция лежит выше определенного порога, мы определяем за постоянное время уменьшенный набор точек, достаточно близких к точке запроса (положению луча), чтобы использовать взвешенные методы наименьших квадратов для непрерывной градиентной интерполяции (порядок 2). Несколько значений электрической плотности и значений компонентов магнитного поля были интерполированы таким образом, чтобы проверить точность реализованного метода [3]. Мы можем упомянуть, что логарифм физической величины интерполируется вместо самой величины из-за ее возможных высоких вариаций.

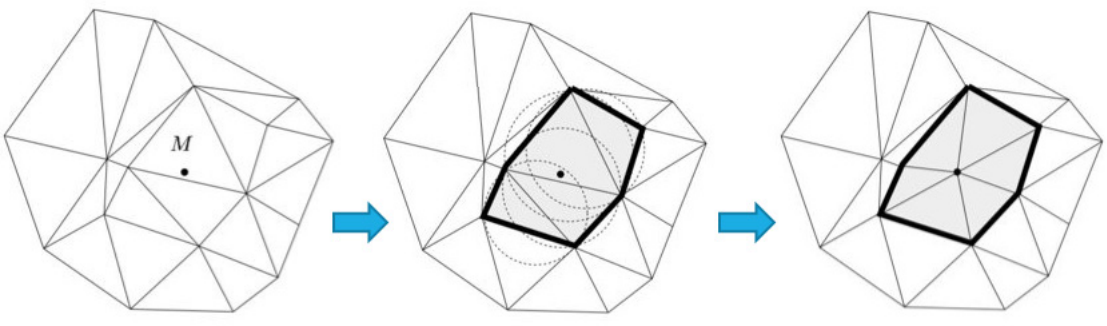



*Рис. 1. Схема алгоритма Делоне*

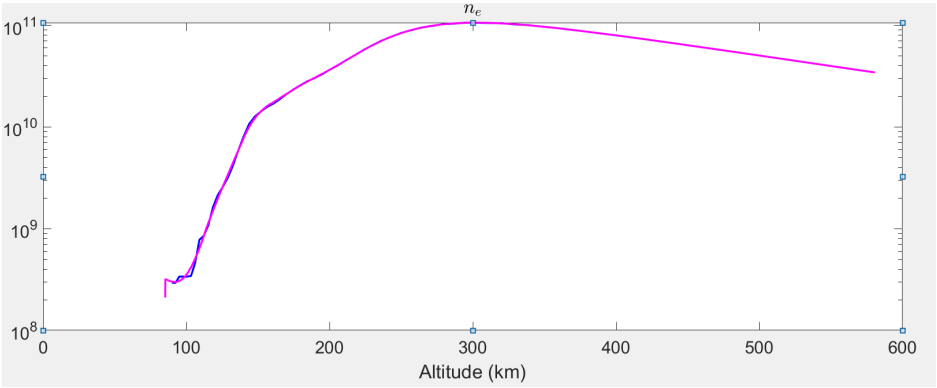



*Рис. 2. Пример интерполированных $n_e$ в зависимости от высоты (розовый) и известных значений (синий). Логарифмическая шкала*

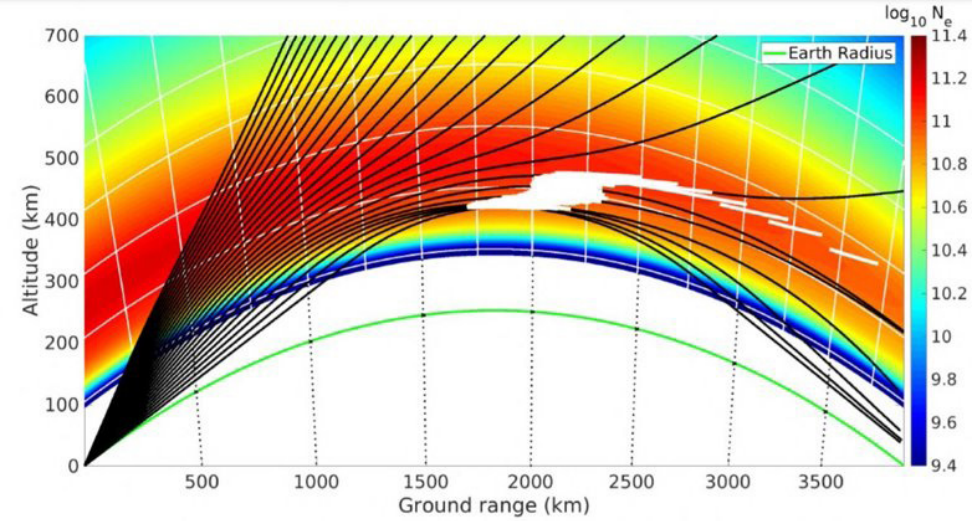



*Рис. 3. Трассировка лучей с различным наклоном в черном цвете, f = 13MHz*

На рис. 2 показан пример интерполированной электрической плотности вдоль вертикали. Интерполяция приводит к фильтру нижних частот на характеристических длинах.

## Численное интегрирование

Проекция уравнений распространения (принцип Ферма) приводит к системе из шести нелинейных уравнений первого порядка [4]. Поскольку масштабы вариаций сильно различаются в областях с разным оптическим индексом, мы решили полагаться на адаптивный пошаговый метод. Метод Рунге-Кутты 4–5-го порядка выдает ошибку, ограниченную $O\,(h^5)$, где $h$ – адаптивный шаг. На рис. 3 показан пример стандартного вывода в моделируемой ионосфере. Было вычислено несколько значений распространения луча с разным наклоном и одинаковой частотой [4]. Цветовая карта соответствует электрической плотности, то есть главному фактору в выражении оптического индекса, а области белого цвета соответствуют областям отражения.

## Библиографический список

1. *Dahoe A., Cant R.* On Least-Squares Gradient Reconstruction and its application in conjunction with a Rosenbrock method. 2005.

2. *Lilensten J. Blelly P.* Collection Grenoble sciences, ISSN 0767-371X (1999). Du soleil à la terre: aéronomie et météorologie de l'espace.

3. *Hunsucker R., Hargreaves J.* The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. 2011.

4. *Hornus S., Boissonnat J.* An efficient implementation of Delaunay triangulations in medium dimensions. 2008.

**УДК 004.6** **Doi: 10.31799/978-5-8088-1688-6-2022-3-260**

***Е. Н. Яблоков****
*кандидат технических наук, доцент*
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ДЛЯ РАБОТЫ С ПАКЕТНЫМИ ОШИБКАМИ

*Статья освещает принципы кодирования циклическими кодами. Даны базовые понятия циклических кодов, их область применения, способ использования для устранения логических ошибок, отличия от использования других подобных способов для определения ошибочных ситуаций. Также приведена информация по использованию данных кодов для исправления ошибок.*
***Ключевые слова:*** *циклические коды, кодирование, режимы, гражданская авиация.*

***E. N. Yablokov****
*PhD Sc. Tech., Associate Professor*
**St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

# THE USE OF CYCLIC CODES FOR PACKET ERRORS

*This article covers the basic principles of cyclic encoding. The concepts of cyclic codes is given, their area of application, a method of using to eliminate logical errors, differences from the use of other similar methods to determine error situations are given. It also provides information on using these codes to correct errors.*
***Keywords:*** *cycle codes, coding, mode-s, civil aviation.*

Передача битового сообщения предполагает, что любая возможная битовая последовательность может быть правильной. То есть, если в переданном сообщении были приняты один или несколько битов с ошибкой, сообщение может быть неправильно интерпретировано как другое действительное сообщение без ошибок. Метод, используемый для обнаружения ошибок, заключается в добавлении битов четности к сообщению, называемой контрольной суммой, чтобы большинство ошибок канала приводили к распознаваемым недействительным сообщениям. Самым простым и распространенным способом генерации битов четности является один бит, который получается простой операцией сложением по модулю 2. То есть бит паритета можно высчитать с помощью:

$$p = \sum_{i=0}^{m} n_i,$$

где сумма является сложением по модулю 2.

Тогда в любом допустимом сообщении будет четное количество «l»; любая ошибка передачи одного бита приведет к нечетному количеству «l». В общем случае, если к сообщению добавлено s битов четности, то только $2^{s-1}$ из возможных полученных сообщений будут действительными. Пропускная способность канала в этом случае уменьшится в $m/(m+s)$ раз, из чего делается простой вывод о том, что, повышая защиту передачи, уменьшается количество передаваемой полезной информации. Каждый бит (или биты) четности защищает свою часть сообщения, а приемные блоки проектируются таким образом, чтобы максимизировать обнаружения ошибок или даже полностью восстановить исходное сообщение.

Если основной проблемой при передаче данных являются случайные некоррелированные ошибки и именно это должно корректироваться (или определяться), в этом случае максимизируется расстояние Хэмминга кодов, которые участвуют в передаче. Расстояние Хэмминга между двумя допустимыми кодовыми словами определяется как количество битов первого, которое нужно было бы инвертировать для получения любого второго. Если принять, что $f$ – это максимальное расстояние по всем парам кодовых слов, то можно получить следующую зависимость:

$q = f - 1$ – в этом случае возможно определить $q$ ошибок;

$v = \dfrac{f-1}{2}$ – в этом случае возможно исправить $v$ ошибок.

Таким образом, обеспечив нужное расстояние Хемминга, мы получим хорошее помехоустойчивое кодирование при случайных ошибках.

Однако существует другая группа ошибок, называемая пакетными. Данная ситуация характеризуется тем, что возникновения ошибок возможно, но они сконцентрированы в одном месте передаваемого сообщения. Тогда решаем проблему другими способами, например, с помощью циклического кода.

Циклический код – это набор информационных сообщений, в котором допустимые кодовые слова выражаются как кратные от порождающего полинома $T(x)$. То есть для любого кодового слово $A(x)$ справедливо выражение:

$$A(x) = B(x)T(x),$$

где длина результирующего полинома $A(x)$ будет того же порядка, что и длина пакета. Кода определяется порядком таким образом, что не существует кодов со степенью выше степени порождающего полинома [1].

Предположим, что максимальная степень полинома $G(x)$ равна $b$–1. Тогда максимальная пакетная ошибка, которую способен определить данный циклический код, равна $b$. Результирующее сообщение примем равным $n$, оно будет состоять из информационной части длиной $k$ бит и контрольной суммы размером $b$. Общую длину сообщения можно представить в виде суммы данных двух чисел:

$$n = k + b.$$

Циклический код можно записать как сумму с нужными коэффициентами. Предположим, что

$$A_1(x) = B_1(x)T(x) =$$
$$= (a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \ldots + a_1x^1 + a_0).$$

Следующий циклический код представляет собой циклический сдвиг первого:

$$A_2(x) = xB_1(x)T(x) = B_2(x)T(x) =$$

$$= (a_{n-1}x^n + a_{n-2}x^{n-1} + \ldots + a_1x^2 + a_0x) + a_{n-1}(x^n - 1).$$

Так как цикличность кодов достигаются ограничением по модулю максимальной степени $(x^n - 1)$, то слагаемое $a_{n-1}(x^n - 1)$ равно 0. Как видно из получившейся записи, второй код – это сдвинутый код первого. Именно поэтому коды называются цикличные – каждый следующий код является сдвинутым кодом предыдущего.

Предположим, что существует некоторое сообщение $K(x)$. Процесс кодирования этого сообщения циклическим кодом состоит из нескольких этапов. Сначала сообщение сдвигается $M(x)$ на $r$ битов влево, чтобы гарантировать место для поля четности, после само сообщение делится на исходный полином $T(x)$. В процессе деления мы получим некоторый остаток, обозначаемый $R(x)$. Этот остаток и будет являться контрольной суммой, добавляемой к исходному сообщению. Таким образом, будет получено результирующее сообщения $A(x)$.

Если переходить к математической форме, то получившийся код записывается в следующей форме:

$$x^r K(x) = k(x)T(x) + R(x),$$

где сообщение состоит из сдвинутого исходного сообщения и остатка, который является проверочной информацией, используемой как для определения пакетной ошибки. Эта информация может использоваться приемной частью устройств для определения правильности переданной информации. Приемному устройству достаточно знать полином циклического кода и использовать его для исходного сообщения при получении остатка.

Несмотря на сложность записи в математической форме, сам процесс кодирования и получения остатка в качестве контрольной суммы довольно прост.

Предположим, что исходное сообщение 10110, то есть $K(x)$=10110, то есть в математической форме можно записать как $x^4 + x^2 + x$.

Пусть полином циклического кода равен $x^2 + x$, то есть размер остатка будет равен 2 битам.

Проведем поиск контрольной суммы: $x^6 + x^4 + x^3$ – исходное сообщение, сдвинутое на два разряда.

Произведем поиск контрольной суммы путем деления на порождающий полином. В результате данной операции мы получим остаток, который будет являться контрольной суммой для нашего полинома (рис. 1).

Исходя из полученного результата и в соответствии с формулами, записанными выше, мы получаем следующее:

$$x^r K(x) = k(x)T(x) + R(x) =$$
$$= (x^6 + x^4 + x^3) + (x) = x^6 + x^4 + x^3 + x.$$

То есть получившееся сообщение получается 1011010, где младшие два бита составляют контрольную сумму, а старшие пять – само со-

$$
\begin{array}{l|l}
x^6+0+x^4+x^3+0+0+0 & x^2+x \\
\underline{x^6+x^5} & \\
\quad x^5+x^4+x^3 & \\
\quad \underline{x^5+x^4} & \\
\qquad\quad x^3 & \\
\qquad\quad \underline{x^3+x^2} & \\
\qquad\qquad x^2 & \\
\qquad\qquad \underline{x^2+x} & \\
\qquad\qquad\quad x &
\end{array}
$$

*Рис. 1. Получение остатка для формирования контрольной суммы*

общение. Такая контрольная сумма позволяет определить любые два подряд идущие ошибки в сообщении. Увеличивая размер контрольной информации для сообщения, мы можем определять большее количество пакетных ошибок. Это более эффективный способ, чем использование кодирования, основанного на расстоянии Хемминга, для случайных ошибок.

Другим свойством циклических кодов является возможность исправления ошибок посредством циклических кодов. Исправление ошибок возможна посредством наложения так называемого ошибочного синдрома, который получается при ошибках и неправильном декодировании остатка [2].

При отсутствии ошибок стандартное декодирование состоит из получения остатка, таким образом, если у нас есть принятое информационное сообщение S, то правильное принятое сообщение будет следующим:

$$\frac{S}{T(x)} = \frac{k(x)T(x)}{T(x)} + \frac{R(x)}{T(x)} = k(x) + \frac{R(x)}{T(x)}.$$

В итоге будет получено исходное сообщение $k(x)$ и остаток от деления на полином $T(x)$. Остаток от деления $R(x)/T(x)$ должен быть равен 0, если декодирование прошло нормально. При ошибочном декодировании бит данный остаток будет равен некоторому числу, называемым ошибочным синдромом. Данный остаток представляет собой некоторое число, количество бит которого равно количеству бит порождающего полинома. С помощью ошибочного синдрома возможно исправление пакетных ошибок путем обратного умножения синдрома, умноженного на порождающий синдром и умноженного же на исходное сообщение.

Алгоритм исправления будет следующим:

– полученный текущий остаток последовательно умножить на текущее сообщение;

– проверить, что ошибочный синдром исчез;

– если нет, то произвести сдвиг вправо и умножение на порождающий синдром;

– вернуться к пункту 1.

Таким образом, пакетная ошибка, которая произошла в одном месте, может быть исправлена. Правильность и возможность исправлений зависит как от количества ошибок, так и от порождающего полинома и возможность неправильного исправления необходимо учитывать при декодировании.

**Библиографический список**

1. *Gert J.* Fundamentals of Mode S Parity Coding, Project Report ATC-117. Federal Aviation Administration. 1984.

2. *Kasami T.* A decoding procedure for multiple-error-correcting cyclic codes / IEEE Transactions on Information Theory. 1964. Vol. 10. N 2. P. 134–138.

# СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Авдеев Владимир Алексеевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технические средства навигации и управления движением.
Email: apex7781@mail.ru

**Абабков Сергей Олегович**
магистрант кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – машинное обучение, искусственный интеллект, анализ изображений.
Email: ore.ababkov.s@gmail.com

**Барклаевская Наталья Владимировна**
старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационные технологии.
Email: Chistnata@mail.ru

**Беляков Владислав Андреевич**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: belyakovvladik@yandex.ru

**Бирюков Борис Леонтьевич**
старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – измерительно-вычислительные комплексы.
Email: collega.k@yandex.ru

**Бобровский Даниил Александрович**
студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления и эксплуатация аэрокосмической техники.
Email: danilka.bobrovskiy@mail.ru

**Богословский Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование систем наведения летательных аппаратов, бесконтактные датчики на поверхностных акустических волнах, нестационарные системы управления.
Email: svb1963@gmail.com

**Бурлуцкий Сергей Геннадьевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.
Email: Sergey_burluckiy@mail.ru

**Бутомо Константин Михайлович**
магистрант кафедры кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: kbutomo@yandex.ru

**Ван Синь**
доктор технических наук, профессор кафедры обнаружения наведения и автоматического управления.
Шэнянский Политехнический университет.
Область научных интересов – исследование автоматических систем управления и наведения ракеты.
Email: sylaizh@163.com

**Варкентин Данил Дмитриевич**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.

**Винарь Полина Олеговна**
инженер кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – теория помехоустойчивого кодирования.
Email: polinavinar@yandex.ru

**Гребенщиков Дмитрий Игоревич**
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – компьютерное зрение, нейронные сети.
Email: Dimss6300@ya.ru

**Григорьев Александр Павлович**
старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авиационные приборы и системы.
Email: alexgrig-1986@mail.ru

**Джун Гонг**
аспирант кафедры обнаружения наведения и автоматического управления
Шэнянский Политехнический университет.
Область научных интересов – исследование автоматических систем управления и наведения ракет.

**Добровольская Ангелина Александровна**
аспирант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – пассажирские перевозки, имитационное моделирование сложных технических систем.
Email: angd999@gmail.com

**Езерский Владимир Васильевич**
доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – космические летательные аппараты и разгонные блоки.
Email: vezerskiy@nii-ps.ru

**Елкина Дарья Андреевна**
бакалавр кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – пассажирские перевозки, грузовые перевозки, авиационные перевозки, морские перевозки, прогнозирование развития, пассажирский поток, логистические операции и функции, математическое моделирование в логистике.
Email: darya.elkina.01@mail.ru

**Жежерин Александр Ростиславович**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – бесконтактные датчики на поверхностных акустических волнах.

**Зеленцова Валерия Валерьевна**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы.
Email: zelentsowa.valeria@yandex.ru

**Иванов Михаил Евгеньевич**
аспирант кафедры управления и эксплуатации аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – исследование авиационных и космических аппаратов и их приборного оборудования.
Email: sindbad1995@list.ru

**Иванов Юрий Павлович**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – анализ и синтез информационно-измерительных систем.
Email: Ypi35@mail.ru

**Изотов Олег Альбертович**
доцент, кандидат технических наук кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – логистика, технологии транспортных процессов.
Email: Iztv65@rambler.ru

**Карандашев Александр Александрович**
инженер института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – бортовые сети, беступиковые маршруты, конфигурации маршрутов, протоколы передачи, моделирование, алгоритмы на графах.
Email: aleksandr.karandashev@guap.ru

**Ковалев Сергей Иванович**
научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – теория помехоустойчивого кодирования.
Email: skovalev52@gmail.com

**Коврегин Валерий Николаевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – навигация, радиолокация, дальнометрия.
Email: kovregin@mail.ru

**Коврегина Галина Михайловна**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – навигация, радиолокация, дальнометрия.
Email: g_kovregina@mail.ru

**Костин Антон Сергеевич**
аспирант кафедры системного анализа и логистики, заведующий лабораторией беспилотных авиационных систем инженерной школы ГУАП, ассистент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – беспилотные авиационные системы.
Email: anton13258@mail.ru

**Кочетков Павел Владимирович**
студент военного учебного центра при ГУАП.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – компьютерное зрение, управление жестами.
Email: pavelkoch7@yandex.ru

**Кузьмичев Юрий Алексеевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов, схемотехника электронных устройств, системы ориентации и управления космическими аппаратами, автоматизированные системы навигации и управления.
Email: y.kuzmichev63@mail.ru

**Кунтуров Андрей Леонидович**
кандидат военных наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авионика, авиационные приборы и системы.
Email: kunturov@rambler.ru

**Кунтуров Сергей Андреевич**
ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – авионика, робототехнические системы и комплексы военного назначения.
Email: kunturov@rambler.ru

**Лебедева Маргарита Сергеевна**
магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, системы гироскопической стабилизации, инерциальные сенсоры параметров движения основания.
Email: lebedevamargo@rambler.ru

**Лезов Алексей Андреевич**
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – физика полимеров и нанокомпозитов; исследование физико-механических свойств как самих материалов, так и сочетаний с другими материалами.
Email: alezov@gmail.com

**Лезова Ирина Евгеньевна**
ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – физика полимеров и нанокомпозитов; исследование физико-механических свойств как самих материалов, так и сочетаний с другими материалами.
Email: irina_gospodchikova@mail.ru

**Лезова Александра Андреевна**
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – кинетика фазовых переходов первого рода; исследование явлений переноса при росте частиц новой фазы в фазовых переходах; теоретическое исследование конформационных свойств в растворах полимеров.
Email: irina_gospodchikova@mail.ru

**Луцив Вадим Ростиславович**
доктор технических наук, профессор кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – компьютерное зрение, искусственные нейронные сети.
Email: vluciv@mail.ru

**Майоров Николай Николаевич**
профессор, доктор технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – теория транспортных процессов и систем, интеллектуальные транспортные системы, прогнозирование развития транспортных систем.
Email: nnm@guap.ru

**Макаров Андрей Александрович**
доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление аэрокосмическими системами.
Email: almakand@mail.ru

**Малашин Роман Олегович**
старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Институт физиологии имени Павлова РАН.
Область научных интересов – машинное обучение, искусственный интеллект, анализ изображений.
Email: malashinroman@mail.ru

**Монаков Андрей Алексеевич**
доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровая обработка сигналов, радиолокация, исследование природных сред радиотехническими методами, управление воздушным движением.
Email: a_monakov@mail.ru

**Мурзаев Алексей Сергеевич**
аспирант кафедры радиотехнических систем
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интегрированные системы навигации, радиолокация и радионавигация.
Email: alexey.mur97@yandex.ru

**Назаренко Павел Александрович**
ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления беспилотными авиационными системами.
Email: nazarenk27@rambler.ru

**Назаров Андрей Вячеславович**
профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами, доктор технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – распознавание образов, нейросетевые технологии, обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных системах космических комплексов, системы управления и эксплуатация аэрокосмической техники.
Email: naz-av@mail.ru

**Небылов Александр Владимирович**
доктор технических наук, профессор, директор Международного института передовых аэрокосмических технологий, заведующий кафедрой аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление движением, навигация, аэрокосмические аппараты, экранопланы, датчики.
Email: nebylov@aanet.ru

**Небылов Владимир Александрович**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление движением, навигация, аэрокосмические аппараты, экранопланы, датчики.
Email: vladnebylov@gmail.com

**Овчинникова Наталья Анатольевна**
кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации.
Email: brodsky@aanet.ru

**Оленев Валентин Леонидович**
кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование, встроенные системы.
Email: valentin.olenev@guap.ru

**Панкова Яна Игоревна**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.

**Панферов Александр Иванович**
кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальная оптимизация и приложения, математическая оптимизация, производительность, управление относительным движением, распределенные системы управления.
Email: panferov@aanet.ru

**Перлюк Владимир Владимирович**
кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование сложных технических систем, управление группировкой беспилотных аппаратов, микроспутники, летательные аппараты.
Email: perlvv@mail.ru

**Петров Алексей Юрьевич**
магистрант кафедры информатики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование, сетевые технологии.
Email: palexeq1998@yandex.ru

**Петров Артем Антонович**
бакалавр кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – встроенные системы обработки информации и управления.
Email: script_pa@vk.com

**Пецевич Максим Денисович**
студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование и исследование работы систем космических аппаратов.
Email: petsevichmaxim@yandex.ru

**Пляскина Алина Андреевна**
аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – законы управления летательного аппарата, вертолетостроение.
Email: kunturov@rambler.ru

**Познякова Татьяна Павловна**
студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления движением и навигация, управление упругими конструкциями, микромеханика, моделирование.
Email: tatiana.poznyakova@mail.ru

**Рогожин Вячеслав Борисович**
кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – физика полимеров и жидких кристаллов; молекулярные свойства функциональных полимеров для медицины, фармакологии, органической электроники и способы их целевой модификации.
Email: irina_gospodchikova@mail.ru

**Рубинов Владислав Валерьевич**
аспирант кафедры системного анализа и логистики, инженер лаборатории транспортной логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: vvr1071995@mail.ru

**Румянцев Максим Евгеньевич**
бакалавр кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: JSAMR18@yandex.ru

**Русселе Максим**
магистрант
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Французский высший институт аэронавтики и космоса.
Область научных интересов – астрофизика, физика плазмы.
Email: maximerousselet@outlook.fr

**Сайфуллина Алиса Витальевна**
аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмического приборостроения.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления летательными аппаратами, имитационное моделирование.
Email: alisa.say1998@gmail.com

**Сатарова Валерия Игоревна**
ассистент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления беспилотными авиационными системами.
Email: satarova.valery@yandex.ru

**Семенова Валентина Павловна**
магистрант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – эксплуатация и управление аэрокосмическими системами.
Email: vsvally@mail.ru

**Скорина Сергей Феодосиевич**
кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы автоматического управления, теория надежности, инерциальные сенсоры параметров движения основания.
Email: ssf@aanet.ru

**Слободчиков Николай Александрович**
кандидат военных наук, профессор кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – логистика, технологии транспортных процессов, моделирование транспортных процессов.
Email: kola_slob@mail.ru

**Смирнова Анастасия Алексеевна**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – массовые перевозки пассажиров и грузов.
Email: Nastena100599@mail.ru

**Сорокина Анастасия Викторовна**
магистрант кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – измерительно-вычислительные системы.
Email: anastasiya_sorokina7@mail.ru

**Степанов Владимир Евгеньевич**
профессор кафедры информатики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование, многополосные методы передачи данных.
Email: vladimir.stepanov@guap.ru

**Суворова Елена Александровна**
кандидат технических наук, доцент, заведующая лабораторией института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий.
Область научных интересов – системы и сети на кристалле, динамически реконфигурируемые системы, локальные сети аэрокосмического назначения, парирование ошибок в сетях.
Email: wildcat15@yandex.ru

**Сумманен Александр Викторович**
доцент, кандидат технических наук кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – логистика, технологии транспортных процессов.
Email: 89215728754@mail.ru

**Сыщиков Алексей Юрьевич**
заведующий лабораторией института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – параллельное программирование, встраиваемые вычислительные сети.
Email: alexey.syschikov@guap.ru

**Тарасенков Андрей Александрович**
старший преподаватель кафедры аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – приборостроение, радиотехника, обработка сигналов.
Email: Wagir@mail.ru

**Тарасова Евгения Константиновна**
студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – моделирование работы и исследование устройства средств выведения.
Email: jesa-@mail.ru

**Таратун Виталий Евгеньевич**
старший преподаватель кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы, транспортное моделирование, прогнозирование, моделирование управления в цепях поставок.
Email: taratun.vitaliy@gmail.com

**Таратун Екатерина Александровна**
ассистент кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – интеллектуальные транспортные системы, транспортное моделирование, прогнозирование, моделирование управления в цепях поставок.
Email: losekaterina@yandex.ru

**Таубин Феликс Александрович**
доктор технических наук, профессор кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – цифровые системы передачи информации.
Email: ftaubin@yahoo.com

**Тычко Ольга Владимировна**
магистрант кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: olga1999tychko@yandex.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, интеллектуальные транспортные системы.
Email: uglkvserg@mail.ru

**Фетисов Владимир Андреевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление движением, навигация, технология транспортных процессов, системный анализ и управление, теория принятие решения при неопределенности.
Email: fet1vlad@yandex.ru

**Ху Сяоян**
доктор технических наук, профессор кафедры систем наведения и автоматического управления.
Шэнянский Политехнический университет.
Область научных интересов – исследование автоматических систем наведения и управления ракетами.
Email: Xiaoyang_hu@163.com

**Цируль Яков Георгиевич**
аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – исследование модели и алгоритмов процесса изменения структуры системы управления движением космического аппарата.
Email: ytsirul@mail.ru

**Шарапова Ольга Михайловна**
старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – информационные технологии.
Email: Shom54@mail.ru

**Шварок Анастасия Дмитриевна**
студент кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – системы управления движением и навигация, управление упругими конструкциями, микромеханика, моделирование.
Email: ad_shvarok99@mail.ru

**Шехунова Наталия Александровна**
кандидат технических наук, профессор кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – теория информации.
Email: ntlshnva@gmail.com

**Шматко Юлия Вячеславовна**
бакалавр кафедры системного анализа и логистики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – технология транспортных процессов.
Email: yulechka-shmatko@mail.ru

**Шпигун Павел Владимирович**
бакалавр кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – встроенные системы обработки информации и управления.
Email: shpagin.pp@gmail.com

**Штындик Роман Валерьевич**
АО «Конструкторское бюро «Арсенал» им. М. В. Фрунзе», инженер 1 категории сектора Телеметрических систем направления «Ракетно-космическая техника».
Область научных интересов – автоматизированные, адаптивные и интеллектуальные системы, волоконно-оптические датчики, измерения ионизирующих излучений.
Email: rshtyndik@mail.ru

**Щелкунов Евгений Викторович**
аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – гироскопические приборы, моделирование аэрокосмических систем.
Email: chelkunov9715@gmail.com

**Эпаев Николай Николаевич**
бакалавр кафедры аэрокосмических компьютерных и программных систем.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – встроенные системы обработки информации и управления.
Email: pectin34@gmail.com

**Яблоков Евгений Николаевич**
кандидат технических наук, профессор кафедры информатики.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – использование циклических кодов для работы с пакетными ошибками.
Email: evgeny.yablokov@guap.ru

# СОДЕРЖАНИЕ

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ..... 5**

***Бирюков Б. Л.*** ОЦЕНИВАНИЕ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ..... 5

***Бирюков Б. Л., Сорокина А. В.*** ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ..... 11

***Небылов А. В., Небылов В. А.*** БУДЕТ ЛИ ПОСТРОЕН НОВЫЙ БОЛЬШОЙ ЭКРАНОПЛАН? ..... 16

***Синь В., Гонг Д., Перлюк В. В.*** ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА НАВЕДЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ УГЛА ВСТРЕЧИ НА ОСНОВЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ..... 20

***Сяоян Х., Богословский С. В., Жежерин А. Р., Перлюк В. В., Сорокина А. В.*** ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ПАВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ..... 26

***Сяоян Х., Перлюк В. В.*** ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НЕЧЕТКОГО КОНТРОЛЛЕРА ПРЯМОЙ СВЯЗИ ..... 33

***Тарасенков А. А., Монаков А. А.*** ВЫБОР ЗАКОНА ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ РАДИОВЫСОТОМЕРА МАЛЫХ ВЫСОТ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОНТУРОМ ФАПЧ ..... 39

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИСТИКА ..... 43**

***Беляков В. А., Сумманен А. В.*** РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ ..... 43

***Бутомо К. М., Уголков С. В.*** НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ ..... 49

***Варкентин Д. Д., Уголков С. В.*** МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ ..... 55

***Добровольская А. А., Фетисов В. А.*** ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА МИКРОУРОВНЕ ТРАНСПОРТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ..... 59

***Елкина Д. А., Майоров Н. Н.*** ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА В АЭРОПОРТАХ НА ОСНОВЕ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИИ ..... 65

***Зеленцова В. В., Слободчиков Н. А.*** ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА В СОВРЕМЕННЫХ ГОРОДАХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ ..... 70

***Изотов О. А.*** ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА В ЗАДАЧАХ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ..... 76

***Коврегин В. Н., Коврегина Г. М.*** АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ БЫСТРОГО РАСКРЫТИЯ СЛЕПЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА В БОРТОВЫХ ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ РАДАРАХ ..... 79

***Костин А. С., Шматко Ю. В., Румянцев М. Е.*** МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА СКЛАДЕ ДЛЯ ПОИСКА И ИДЕНТИФИКАЦИИ QR-КОДОВ И ЦВЕТНЫХ МЕТОК ..... 84

***Мурзаев А. С., Коврегин В. Н.*** ЗАДАЧА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ/ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ПРИ АППАРАТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ В РАДАРАХ С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-ИЗЛУЧЕНИЕМ ..... 90

***Панкова Я. И., Уголков С. В.*** ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗКИ КАТАЛИЗАТОРОВ ИЗ АНГАРСКА В БАКУ ..... 97

***Рубинов В. В.*** РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА УРОВНЕ МАРШРУТОВ ..... 103

***Смирнова А. А., Уголков С. В.*** СОЗДАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ..... 108

***Таратун В. Е., Таратун Е. А.*** ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ..... 112

***Тычко О. В., Уголков С. В.*** ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ФРУКТОВ ИЗ ТАИЛАНДА В РОССИЙСКУЮ ФЕДЕРАЦИЮ ..... 115

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ..... 123**

***Авдеев В. А., Семенова В. П.*** ОБОСНОВАНИЕ ОБЛИКА СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЯ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В АЭРОПОРТУ ..... 123

***Кузьмичев Ю. А., Пецевич М. Д., Тарасова Е. К.*** ВАРИАНТЫ АВТОПОДСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО ФИЛЬТРА В СИСТЕМЕ УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННОЙ ..... 127

***Кунтуров А. Л., Кунтуров С. А.*** ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ГОТОВНОСТИ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ПРЕДНАЗНАЧЕНИЮ ..... 131

***Бурлуцкий С. Г., Назаров А. В., Бобровский Д. А.*** РАСПОЗНАВАНИЕ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ ОТСЧЕТОВ МНОГОМЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ..... 134

***Григорьев А. П.*** РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ ..... 141

***Григорьев А. П.*** СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ..... 147

***Езерский В. В., Пляскина А. А.*** СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИАЛЬНОГО ОСНАЩЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ ..... 153

***Лебедева М. С., Скорина С. Ф.*** ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННЫХ МОМЕНТОВ В ДВУХОСНОМ ГИРОСКОПИЧЕСКОМ СТАБИЛИЗАТОРЕ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ ..... 158

***Иванов М. Е., Езерский В. В.*** МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НИЗКОЛЕТЯЩИМ АППАРАТОМ ПО КАНАЛУ РЫСКАНЬЯ В MATLAB SIMULINK ..... 162

***Овчинникова Н. А., Назаренко П. А., Сатарова В. И.*** МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТИПА КВАДРОКОПТЕР И МОДЕЛИРОВАНИЕ В MATLAB SIMULINK ..... 166

***Сайфуллина А. В.*** МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ПОДВИЖНУЮ ЦЕЛЬ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ..... 170

***Цируль Я. Г.*** КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ В КАЧЕСТВЕ СЛОЖНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ..... 174

***Панферов А. И., Шварок А. Д., Познякова Т. П.*** СТРУННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ ..... 177

***Лезова И. Е., Лезов А. А., Лезова А. А., Рогожин В. Б.*** РАЗРАБОТКА МЕЗОМАСШТАБНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ..... 180

***Григорьев А. П., Бурлуцкий С. Г., Штындик Р. В.*** РАЗРАБОТКА КОСМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА НАВИГАЦИИ И ВРЕМЕНИ ..... 185

***Щелкунов Е. В., Макаров А. А.*** АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ И ИХ ПАРАМЕТРОВ ..... 189

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 193**

***Абабков С. О., Малашин Р. О.*** МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММ ..... 193

***Барклаевская Н. В., Шарапова О. М.*** СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОПУЛЯРНЫХ ПАКЕТОВ DENWER И OPEN SERVER, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ WEB-САЙТОВ ..... 198

***Ковалев С. И., Винарь П. О.*** МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ LDPC-КОДОВ С БОЛЬШИМ МИНИМАЛЬНЫМ ОБХВАТОМ ..... 202

***Кочетков П. В., Луцив В. Р.*** АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЖЕСТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ БЫТОВОЙ АУДИО-, ВИДЕОТЕХНИКОЙ ..... 206

***Луцив В. Р., Гребенщиков Д. И.*** ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО НАБЛЮДЕНИЯ ..... 210

***Оленев В. Л., Карандашев А. А.*** БЕСТУПИКОВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ С ЧЕРВЯЧНОЙ КОММУТАЦИЕЙ ..... 215

***Петров А. А., Эпаев Н. Н., Шпигун П. В., Сыщиков А. Ю.*** СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПРОТЯЖЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ АВТОНОМНЫМИ ДРОНАМИ ..... 222

***Степанов В. Е.*** СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ВЫЗОВЫ МЕТОДОВ МНОГОПОЛОСНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ..... 229

***Суворова Е. А.*** МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ БУФЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА ВИРТУАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ СТАНДАРТА SPACEFIBRE ..... 233

***Суворова Е. А.*** ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MPI В СЕТЯХ SPACEFIBRE ..... 243

***Таубин Ф. А.*** ПЕРЕДАЧА С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ В КАНАЛАХ С ЛИНЕЙНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ ..... 253

***Шехунова Н. А., Русселе М.*** ИНСТРУМЕНТ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ИОНОСФЕРЫ – МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ ..... 257

***Яблоков Е. Н.*** ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ДЛЯ РАБОТЫ С ПАКЕТНЫМИ ОШИБКАМИ ..... 260

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ..... 263**

Научное издание

# АЭРОКОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Третья Международная научная конференция
14–22 апреля 2022 г.

Сборник докладов

ISBN: 978-5-8088-1688-6

Ответственные за выпуск:
*В. В. Рубинов, В. Е. Таратун*

Редакторская подготовка *Е. В. Тороповой*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 11.02.2022. Дата выхода в свет: 16.02.2022. Формат 60x84 1/8.
Усл. печ. л. 32,0. Уч.-изд. л. 47,0. Тираж 150 экз. Заказ № 47.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно