



ГУАП

Санкт-Петербургский
государственный
университет
аэрокосмического
приборостроения

ИННОВАЦИОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Научный журнал

Том 2, № 4 • 2023

INNOVATIVE INSTRUMENTATION

Scientific Journal

Vol. 2, no. 4 • 2023



SUAI

Saint Petersburg
State University
of Aerospace
Instrumentation

Innovative Instrumentation

Founded in 2022

Founder

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Publisher

Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Chief Editor

E. A. Frolova,
D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor,
Director at the Institute of Fundamental
Training and Technological Innovation,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Deputy Chief Editor

S. A. Nazarevich,
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor

Executive Secretary

V. A. Tushavin,
D. Sc. in Technical Sciences

Editorial Board

A. R. Bestugin, D. Sc., Prof.
A. S. Budagov, D. Sc., Assoc. Prof.
N. A. Zhilnikova, D. Sc., Assoc. Prof.
M. L. Krichevsky, D. Sc., Prof.
N. N. Maiorov, D. Sc., Assoc. Prof.
A. V. Nebylov, D. Sc., Prof.
A. O. Smirnov, D. Sc., Assoc. Prof.
T. M. Tatarnikova, D. Sc., Prof.
V. A. Tushavin, D. Sc.
V. G. Farafonov, D. Sc., Prof.
E. A. Frolova, D. Sc., Assoc. Prof.
V. F. Shishlakov, D. Sc., Prof.

Scientific Journal

The journal was registered in the Federal Service for
Supervision of Communications, Information Technology
and Mass Media (Roskomnadzor),
PI no. FS 77-83496 from June, 24, 2022

Publication frequency: 6 issues per year

The journal's pages are open for discussion
materials; its content does not necessarily reflect
the views of the founder and the editorial board.

Reprinting of publications from the journal
"Innovative Instrumentation" to foreign editions
is allowed by agreement with the editorial board.

Reference to the journal "Innovative Instrumentation"
is mandatory.

Editorial and publisher's address

The Editorial and Publishing Center,
SUAI, 67, lit. A, Bolshaya Morskaya str.,
Saint Petersburg, 190000, Russian Federation
Tel.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Website: <https://guap.ru/inps>

Editorial Council

Yu. A. Antokhina, D. Sc., Prof.
A. V. Demidov, D. Sc., Prof.
V. V. Ivanov, D. Sc., RAS Corr. Member
G. A. Korzhavin, D. Sc., Prof.
A. A. Ovodenko, D. Sc., Prof.
V. V. Okrepilov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. G. Peshehonov, D. Sc., Prof., RAS Academician
V. I. Shevchenko, D. Sc.
E. V. Shlyakhto, D. Sc., Prof., RAS Academician

Editor *V. A. Chernikova*
Computer layout and design *Yu. V. Umnitsyna*

Submitted for publication 19.05.2023. Signed for printing: 26.05.2023. Format 60 × 84 1/8.

Printed at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, lit. A, Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

Free distribution

Инновационное приборостроение

Основан в 2022 г.

Учредитель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Издатель

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Главный редактор

Е. А. Фролова,
доктор технических наук, доцент,
директор института фундаментальной
подготовки и технологических инноваций,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

Заместитель главного редактора

С. А. Назаревич,
кандидат технических наук, доцент

Ответственный секретарь

В. А. Тушавин,
доктор технических наук

Редакционная коллегия

А. Р. Бестугин, д-р техн. наук, проф.
А. С. Будагов, д-р экон. наук, доц.
Н. А. Жильникова, д-р техн. наук, доц.
М. Л. Кричевский, д-р техн. наук, проф.
Н. Н. Майоров, д-р техн. наук, доц.
А. В. Небылов, д-р техн. наук, проф.
А. О. Смирнов, д-р физ.-мат. наук, доц.
Т. М. Татарникова, д-р техн. наук, проф.
В. А. Тушавин, д-р техн. наук
В. Г. Фарафонов, д-р физ.-мат. наук, проф.
Е. А. Фролова, д-р техн. наук, доц.
В. Ф. Шишлаков, д-р техн. наук, проф.

Научный журнал

Журнал зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 24 июня 2022 г.
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83496
от 24.06.2022 – печатное издание)

Периодичность издания: 6 номеров в год

Страницы журнала открыты для дискуссионных
материалов; его содержание не обязательно
отражает точку зрения учредителя и редакции.

Перепечатка публикаций из журнала «Инновационное
приборостроение» в зарубежные издания допускается
по согласованию с редакцией.

Ссылка на журнал «Инновационное приборостроение»
обязательна.

Адрес редакции и издателя

Редакционно-издательский центр
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
190000, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
Тел.: (812) 494-70-69
E-mail: ip@guap.ru
Сайт: <https://guap.ru/inps>

Редакционный совет

Ю. А. Антохина, д-р экон. наук, проф.
А. В. Демидов, д-р техн. наук, проф.
В. В. Иванов, д-р экон. наук, чл.-корр. РАН
Г. А. Коржавин, д-р техн. наук, проф.
А. А. Оводенко, д-р техн. наук, проф.
В. В. Окрепилов, д-р экон. наук, проф., акад. РАН
В. Г. Пешехонов, д-р техн. наук, проф., акад. РАН
В. И. Шевченко, д-р физ.-мат. наук
Е. В. Шляхто, д-р мед. наук, проф., акад. РАН

Редактор *В. А. Черникова*

Компьютерная верстка и дизайн *Ю. В. Умницыной*

Подписано к печати 19.05.2023. Дата выхода в свет: 26.05.2023. Формат 60 × 84 1/8.
Уч.-изд. л. 12. Усл. печ. л. 11,5. Тираж 1000 экз. (1-й завод – 100 экз.). Заказ № 231.

Отпечатано в редакционно-издательском центре ГУАП
190000, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

Распространяется бесплатно

О ЖУРНАЛЕ

Научный журнал «Инновационное приборостроение» – периодическое научное СМИ, которое издается с 2022 г. Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) с целью консолидации и развития научных знаний и практических наработок в основных сферах его научной деятельности. В журнале «Инновационное приборостроение» публикуются научные обзоры, статьи проблемного и научно-практического характера по следующим направлениям: приборостроение, метрология, стандартизация и управление качеством; радиотехника, инфокоммуникационные технологии и системы связи; кибберфизические системы и цифровая трансформация; фундаментальные науки и прикладные исследования; цифровая экономика и управление организацией.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство ПИ № ФС 77-83496 от 24.06.2022.

Проектирование системы управления активного фильтра гармоник

Никита Константинович Третьяков¹

✉ nt7836655@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4795-5181

Владимир Павлович Кузьменко¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875

Оксана Ярославна Солёная¹

osolenaya@list.ru, orcid.org/0000-0003-4901-3884

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В настоящее время особое внимание уделяется проблеме обеспечения качества заданных параметров электрической сети, в результате чего все большее распространение в электросетях получают активные фильтры подавления высокочастотных гармоник, являющиеся преобразователями электрической энергии. На рынке значительное распространение получили преобразователи импортного производителя, что связано с отсутствием конкурентоспособного отечественного предложения. Проектирование активного фильтра гармоник является комплексной задачей оптимизации программной и аппаратной частей. В процессе разработки устройства существует высокая вероятность допустить ряд технических ошибок, что может повлиять на снижение эффективности и срока службы изделия. Для решения описанных проблем необходимо использовать комплексный подход к проектированию преобразователя с учетом оптимизации программной и аппаратной частей устройства. Целью исследования является повышение эффективности работы активного фильтра гармоник путем разработки оптимизированной системы управления для поддержания заданных качественных параметров городской электросети переменного трехфазного напряжения. При проведении исследований использованы методы структурного и математического анализа, построения моделей в среде динамического моделирования. Результатом исследования является модель системы управления активным фильтром гармоник с учетом процессов, включающих работу аппаратной части.

Ключевые слова: система управления, активный фильтр, аппаратная часть, ток, напряжение, микроконтроллер, ПИД-регулятор, моделирование

Для цитирования: Третьяков Н. К., Кузьменко В. П., Солёная О. Я. Проектирование системы управления активного фильтра гармоник // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 5–10. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-5-10.

Original article

Designing an active harmonic filter control system

Nikita K. Tretiakov¹

✉ nt7836655@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4795-5181

Vladimir P. Kuzmenko¹

mr.konnny@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0270-4875

Oksana Ya. Solenaya¹

osolenaya@list.ru, orcid.org/0000-0003-4901-3884

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. At present, special attention is paid to the problem of ensuring the quality of the specified parameters of the electrical network, because of which active filters for suppressing high-frequency harmonics, which are electrical energy converters, are becoming more widespread in power networks. In the market, converters of an imported manufacturer have become widespread due to the lack of domestic supply. Designing an active harmonic filter is a complex task of optimizing software and hardware in accordance. During the development of the device, there is a high probability of making several technical errors, which can affect the efficiency and service life of the product. To solve the described difficulties, it is necessary to use a hierarchical approach to the design of the converter, considering the optimization of the software and hardware of the device. The aim of the study is to increase the efficiency of the active harmonic filter by developing an optimized control system to maintain the specified quality parameters of the urban three-phase AC voltage network. When conducting research, methods of structural and mathematical analysis, building models in the dynamic modeling environment were used. The result of the study is a model of the active harmonic filter control system, considering the processes, including the operation of the hardware.

Keywords: control system, active filter, hardware, current, voltage, microcontroller, PID controller, simulation

For citation: Tretiakov N. K., Kuzmenko V. P., Solenaya O. Ya. Designing an active harmonic filter control system. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(4):5–10. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-5-10.

Введение

При анализе параметров систем электроснабжения требуется выполнить анализ характеристик потребителей электроэнергии, влияющих на качество электросети. Любые искажения формы и фазы токов и напряжений являются параметрами, снижающими качество электросети за счет появления реактивной составляющей и изменения амплитудного значения. Различные типы потребителей электрической энергии влияют на сеть искажением формы или отклонением фазы тока и напряжения, для первого случая используются активные фильтры, для второго – пассивные [1, 2]. Использование в сетях различных преобразователей электрической энергии, построенных без применения корректора коэффициента мощности (ККМ), повышает гармоническую составляющую сети и увеличивает амплитудное значение тока, следовательно, ведет к появлению дополнительных требований к устройствам защиты электросети [3]. Согласно ГОСТ IEC/TR 61000-3-6-2020, системы электроснабжения должны обеспечивать параметр «Total Harmonic Distorsions» (ТНД, коэффициент нелинейных искажений, КНИ), характеризующий степень отличия формы сигнала от синусоидальной, меньшую или равную 8 % [4, 5]. Для улучшения качества электросети применяется активный фильтр, представляющий собой преобразователь электрической энергии.

Основной функцией активного фильтра является уменьшение гармонической составляющей тока электросети. Форма тока в сети определяется видом нагрузки. При моделировании активной и реактивной нагрузки на электросеть бесконечной мощности ток нагрузки не влияет на форму напряжения. На практике при реактивных нагрузках номинальной мощности искажению подлежит напряжение. Справедливо суждение, что активный фильтр гармоник влияет как на ток электросети, так и на напряжение, увеличивая их качественные параметры.

Принцип работы активного фильтра гармоник заключается в формировании тока (в основном имеющего реактивный характер) с требуемой частотой, формой и углом фазового сдвига по отношению к напряжению сети для уменьшения гармонической составляющей.

Проектирование данного типа преобразователей электрической энергии является комплексной задачей, включающей в себя ряд схемотехнических, конструкторских и программных решений и компромиссов [6]. Общепринятая практика разработки электронных изделий состоит из четкого разделения задач вышеперечисленных областей.

Проектирование системы управления активного фильтра гармоник является актуальной научно-технической задачей, от которой зависят качество и безопасность эксплуатации устройства для поддержания заданных параметров электроэнергии в городских сетях трехфазного переменного напряжения на уровне действующих нормативных документов, что обеспечивает возможность применения различными типами потребителей [7].

Проектирование аппаратной части активного фильтра гармоник

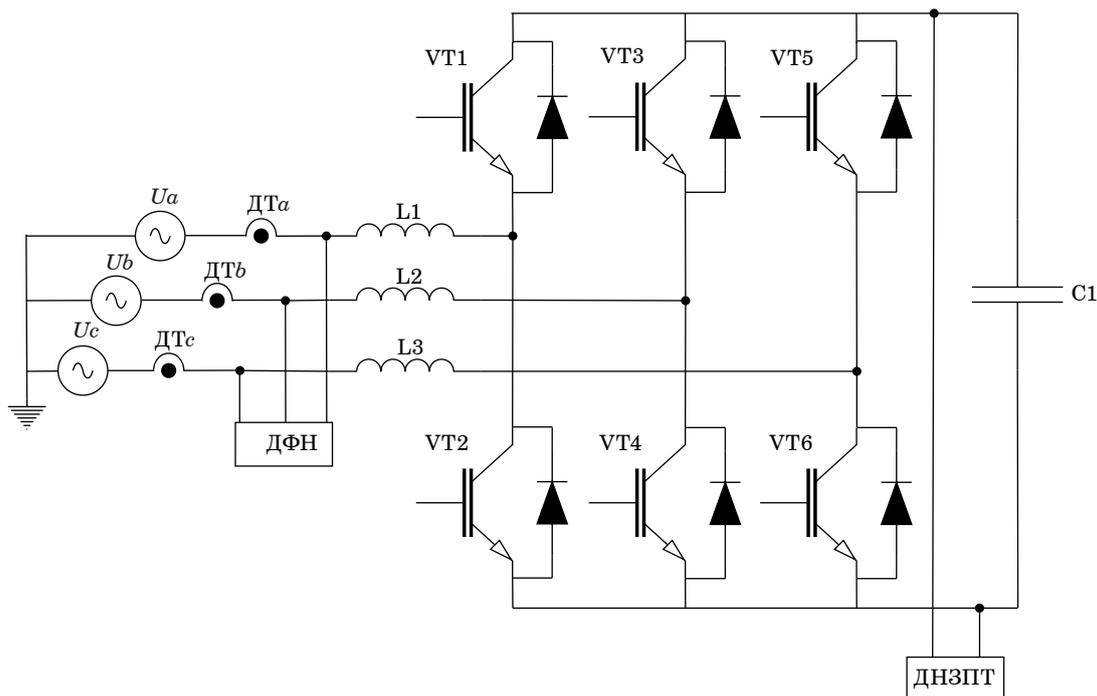
Аппаратную часть принято разделять на две группы: силовая часть – активный трехфазный выпрямитель, конденсаторное звено постоянного тока (ЗПТ); управление – источник питания собственных нужд, датчики, драйверы управления транзисторами и вычислительный микроконтроллер.

Первый этап разработки изделия включает в себя определение основных параметров, функций, видов защит и выбор компонентной базы для решения требуемых задач.

Для выполнения алгоритма управления и контроля параметров безопасной эксплуатации требуется измерять межфазное напряжение (ДФН), напряжение ЗПТ (ДНЗПТ) и фазный ток (ДТ) (рис. 1). Применение данной концепции измерения позволяет включить защиты по отклонению параметров сети, короткому замыканию и току утечки.

Управление транзисторами выполняется драйверами. Драйвер обеспечивает функции гальванической развязки системы управления и силовой части, формирования напряжения для безопасного управления транзисторами и защиты.

Микроконтроллер, исполняющий алгоритм управления и второстепенные задачи, является ключевым элементом системы управления. Существует ряд специализированных контроллеров, имеющих жесткую структуру, для управления преобразователями энергии. К данным контроллерам можно отнести семейства STM32F103xx и TMS320F280xx, имеющие в своей архитектуре гибкий по настройке параметров спектр периферии. Основные требования предъявляются к вычислительной возможности и наличию периферии. Математический аппарат активного фильтра гармоник заключается в векторных преобразованиях и трехконтурном регуляторе, следовательно, минимальными требованиями являются наличие не менее двух таймеров (прерывание широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и работа внешней периферии), работа с 32-битными типами данных и тактовая частота. К периферии предъявляются требования по



• Рис. 1. Функциональная схема активного фильтра
 • Fig. 1. Functional diagram of the active filter

количеству каналов ШИМ и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (в случае активного фильтра шести каналов ШИМ для управления транзисторами и восьми каналов АЦП) и наличие встроенных интерфейсов (CAN, SPI, UART и т. д.) для обмена информацией [8, 9].

Проектирование программной части активного фильтра гармоник

Процесс написания программного обеспечения корректно разделить на следующие этапы: работа с периферией микроконтроллера и написание кода программы.

Первый этап заключается в выполнении правильной настройки таймера прерывания по ШИМ с алгоритмом работы АЦП. Далее происходит непосредственное назначение портов, алгоритма работы (прямой, инверсный ШИМ), типа работы таймера.

Особое внимание требуется уделить формированию «мертвого времени» («dead time»), разделяющего включение транзисторов по схеме «полумост», для предотвращения сквозных токов (короткого замыкания) верхнего и нижнего ключа [10]. Классическим решением при настройке ШИМ преобразователей энергии, включающих в себя полумостовую топологию, является применение типа таймера «up-down» с назначением прямых и

автоматическим формированием инверсных каналов задания.

Одним из компонентов системы управления является классический ПИД-регулятор, описываемый стандартной формулой [11]:

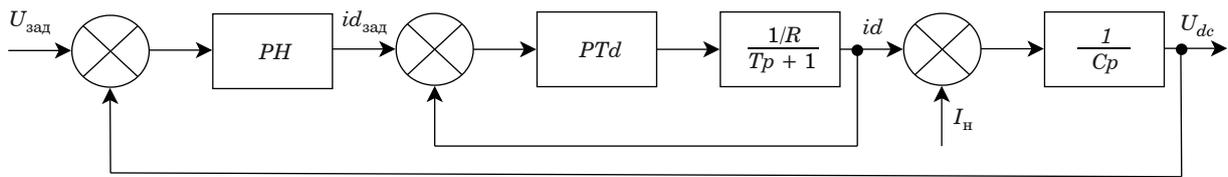
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – сигнал задания; $e(t)$ – ошибка рассогласования; k – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулятора.

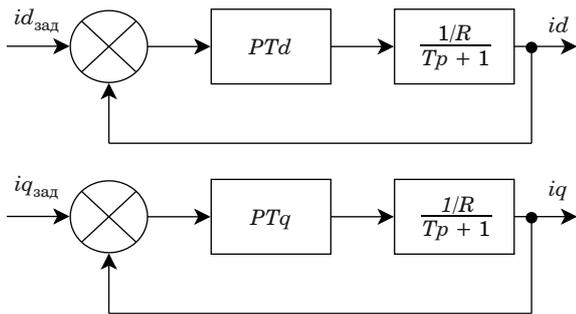
Алгоритм управления активного фильтра гармоник выполняет следующие функции: синхронизация с сетью, ограничение тока транзисторов, подавление гармоник электросети, поддержание напряжения ЗПТ. Следовательно, контур управления состоит из трех регуляторов (напряжения, активного и реактивного тока) (рис. 2; 3) [12]. При проектировании алгоритма требуется учитывать формат переменных и возможность практической реализации при написании программного кода.

Система управления состоит из внешнего контура напряжения и внутреннего контура активного тока d ; контуров тока по осям d и q – активного и реактивного тока. Задача контуров тока состоит в ограничении активного тока и уменьшении реактивного (задание равно нулю).

С учетом координатных преобразований и контуров управления, модель системы управления



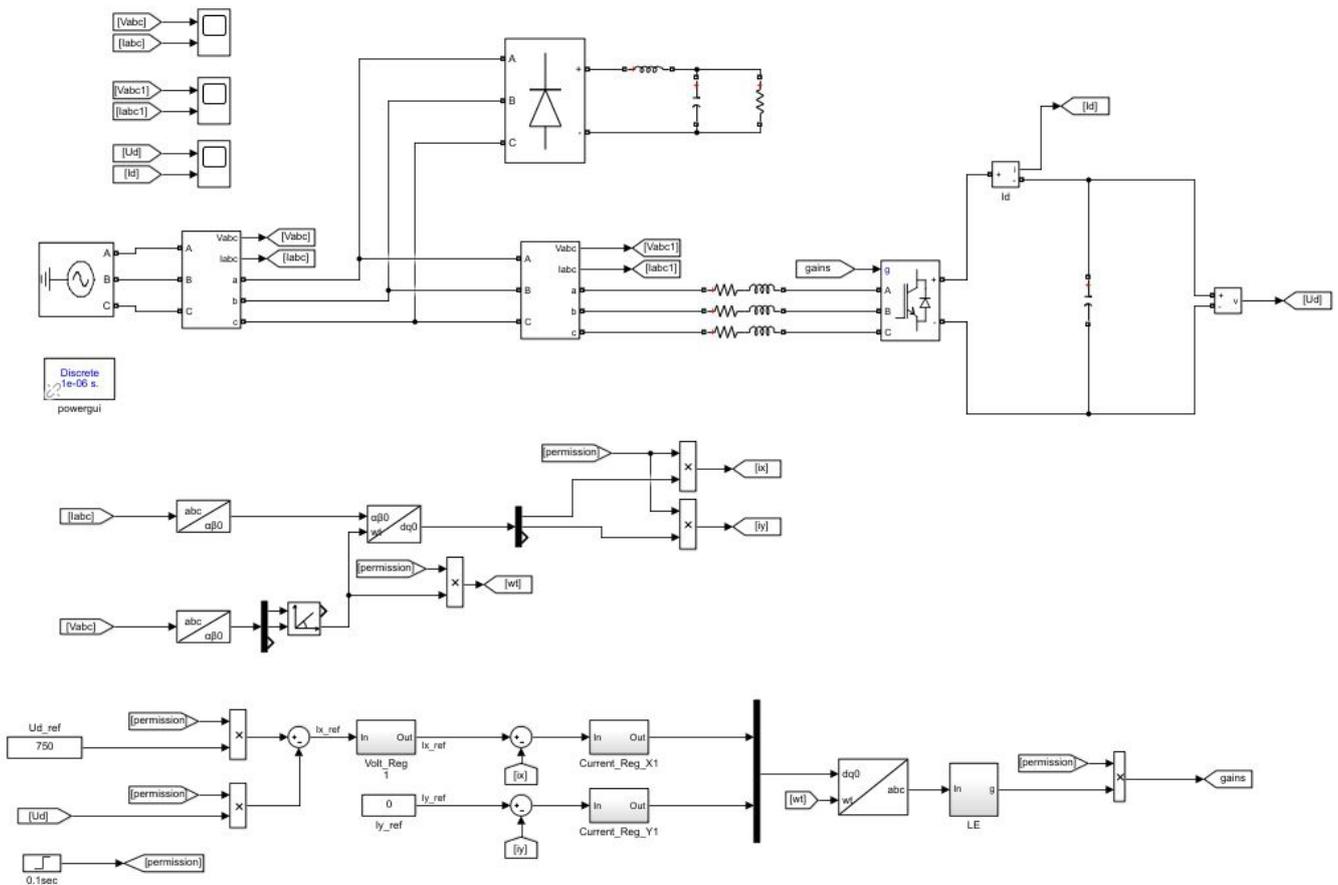
• Рис. 2. Внешний контур регулирования напряжения
 • Fig. 2. External voltage regulation circuit



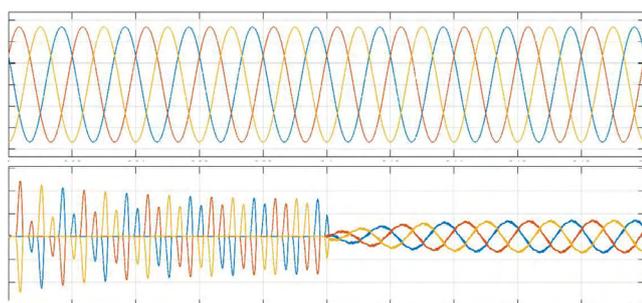
• Рис. 3. Контур тока по осям d и q
 • Fig. 3. Current loop along the d and q axes

имеет вид: контур тока по оси q , стремящийся к нулю, внешний контур напряжения с контуром тока по оси d для ограничения тока транзисторов (рис. 4).

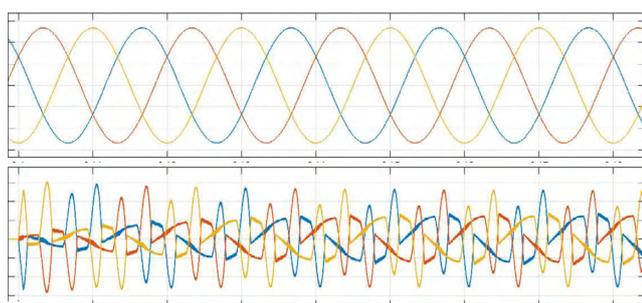
Осциллограммы тока (снизу) и напряжения электросети (сверху) показаны на рис. 5, где в момент времени 0,1 с происходит включение активного фильтра. Моделирование работы активного фильтра выполняли при использовании трехфазной сети бесконечной мощности, нагрузка представляет собой имитацию электрического преобразователя, построенного без применения корректора коэффициента мощности (диодный выпрямитель).



• Рис. 4. Модель системы управления
 • Fig. 4. Model of the control system



• *Рис. 5. Работа активного фильтра гармоник на электросеть*
 • *Fig. 5. Operation of the active harmonic filter on the power grid*



• *Рис. 6. Ток и напряжение активного фильтра*
 • *Fig. 6. Active filter current and voltage*

На рис. 6 показаны осциллограммы тока (внизу) и напряжения активного фильтра гармоник (сверху). Активный фильтр формирует ток с тре-

буемой частотой, формой и углом фазового сдвига по отношению к напряжению сети для уменьшения гармонической составляющей.

Данная модель является наиболее приближенной по переходным процессам к реальному устройству.

Заключение

Применение активного фильтра в электросетях может являться весьма выгодным решением для управления качеством электроэнергии и снижения нагрузки на структуру сети.

Разработанная модель системы управления активным фильтром гармоник и приведенные ее характеристики, в сравнении с реальными параметрами компонентов системы, позволяют сделать вывод об адекватности разработанной системы, однако существующие инструменты моделирования не позволяют произвести точную имитацию работы аппаратной части системы, что говорит о необходимости разработки опытного образца устройства для продолжения дальнейших исследований.

Таким образом, результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности ведения разработки проектируемого устройства, которое позволит добиться улучшения параметров изделия, что окажет положительное влияние на процессы управления и обеспечения качества параметров электрической сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2006. 5 с.
2. ГОСТ 59031. Передача электроэнергии постоянным током высокого напряжения энергия. Фильтры активные электрические. М.: Стандартинформ, 2020. 2 с.
3. ГОСТ 30804.3.12-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока. М.: Стандартинформ, 2013. 2 с.
4. ГОСТ Р 8.762-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник. М.: Стандартинформ, 2014. 2 с.
5. Системы бесперебойного электропитания. URL: <https://www.380v.ru/reference/tech-articles/231-thd-special> (дата обращения: 10.12.2022).
6. Розанов Ю. К., Лепанов М. Г. Силовая электроника. М.: Юрайт, 2023. С. 8–58.
7. Колесников Г. Ю., Щикунов Н. Н. Возможность применения активных фильтров гармоник в распределительных сетях 0,4 кВ // Вестн. Северо-Кавказ. федерального ун-та. 2019. № 4 (73). С. 7–13.
8. Таймер с высоким разрешением в микроконтроллерах STM32. URL: <https://www.compel.ru/lib/140270> (дата обращения: 07.11.2022).
9. UART vs I2C vs SPI – communication protocols and uses. URL: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/> (дата обращения: 22.12.2022).
10. Белов А. В. Микроконтроллеры AVR. От азов программирования до создания практических устройств. СПб.: Наука и техника, 2020. С. 3–146.
11. Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 13–21. Doi: 10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.

12. A composite variable structure PI controller for sensorless speed control systems of IPMSM / W. Feng, J. Bai, Z. Zhang, J. Zhang // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 8292. P. 1–18. Doi: 10.3390/en15218292.

REFERENCES

1. GOST 13109-97. Electric energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform; 2006. 5 p. (In Russ.).
2. GOST 59031. Electricity transmission by direct current high voltage energy. Active electric filters. Moscow: Standartinform; 2020. 2 p. (In Russ.).
3. GOST 30804.3.12-2013. Compatibility of technical means is electromagnetic. Norms of the harmonic components of the current. Moscow: Standartinform; 2013. 2 p. (In Russ.).
4. GOST R 8.762-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification scheme for harmonic coefficient measuring instruments. Moscow: Standartinform; 2014. 2 p. (In Russ.).
5. Uninterruptible power supply systems. Available from: <https://www.380v.ru/reference/tech-articles/231-thd-special> [Accessed 10 December 2022].
6. Rozanov Yu. K., Lapanov M. G. Power electronics. Moscow: Yurayt; 2023, pp. 8–58. (In Russ.).
7. Kolesnikov G. Yu., Shchikunov N. N. Possibility of using active harmonic filters in 0.4 kV distribution networks. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta*. 2019;(4(73)):7–13. (In Russ.).
8. High resolution timer in STM32 microcontrollers. Available from: <https://www.compel.ru/lib/140270> [Accessed 07 November 2022].
9. UART vs I2C vs SPI – communication protocols and uses. Available from: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/09/25/uart-vs-i2c-vs-spi-communication-protocols-and-uses/> [Accessed 22 December 2022].
10. Belov A. V. Mikrokontrollery AVR. Microcontrollers AVR. From the basics of programming to the creation of practical devices. SPb.: Nauka i tekhnika; 2020, pp. 3–146. (In Russ.).
11. Burakov M. V., Konovalov A. S. Nechetkiy supervizor PID-regulyatora. Fuzzy supervisor of the PID controller. *Information and control systems*. 2018;(5):13–21. (In Russ.). Doi: 10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.
12. Feng W., Bai J., Zhang Z., Zhang J. A composite variable structure PI controller for sensorless speed control systems of IPMSM. *Energies*. 2022;15(8292):1–18. Doi: 10.3390/en15218292.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Третьяков Никита Константинович, студент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – цифровая энергетика.

Кузьменко Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности, развитие методов оценки безопасности технологических объектов.

Солёная Оксана Ярославовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – энергосбережение и повышение энергетической эффективности, развитие методов оценки безопасности технологических объектов.

Tretiakov Nikita K., Student at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – digital energy.

Kuzmenko Vladimir P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – energy saving and increasing of energy efficiency, development of methods for assessing the safety of technological objects.

Solenaya Oksana Ya., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – energy saving and increasing of energy efficiency, development of methods for assessing the safety of technological objects.

Поступила в редакцию 20.03.2023

Поступила после рецензирования 28.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 20.03.2023

Revised 28.03.2023

Accepted 28.04.2023

Методы анализа качества в прогнозировании моделей машинного обучения

Александра Валерьевна Винниченко¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

Юлия Павловна Истомина¹

istomina-jp2002@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Исследуются методы, используемые для определения качества и надежности результатов прогнозирования разных моделей машинного обучения (линейная регрессия, лес решений и дерево решений), путем определения альфы Кронбаха, t-критерия Стьюдента, коэффициента конкордации, критерия Фишера для данных по объему инновационных товаров, работ, услуг и данных по вновь введенным или подвергавшимся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет инновационным товарам, работам, услугам.

Ключевые слова: альфа Кронбаха, надежность, машинное обучение, прогнозирование, статистический анализ

Для цитирования: Винниченко А. В., Истомина Ю. П. Методы анализа качества в прогнозировании моделей машинного обучения // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 11–15. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-11-15.

Original article

Methods of quality analysis in predicting machine learning models

Alexandra V. Vinnichenko¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

Yulia P. Istomina¹

istomina-jp2002@yandex.ru

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The methods used to determine the quality and reliability of the prediction results of various machine learning models are carried out (linear regression, decision forest and decision tree), by determining the Cronbach's alpha, Student's t-criterion, concordance coefficient, Fisher criterion for data on the volume of innovative goods, works, services and data of innovative goods, works, services, newly introduced or subjected to significant technological changes over the past three years.

Keywords: Cronbach's alpha, reliability, machine learning, forecasting, statistical analysis

For citation: Vinnichenko A. V., Istomina Yu. P. Methods of quality analysis in predicting machine learning models. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):11–15. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-11-15.

Введение

Машинное обучение – инструмент для прогнозирования результатов, но результаты никогда не могут полностью совпадать с настоящими данными. Для проверки качества модели на данный момент используются метрики качества, такие как доля правильных ответов, среднее гармоническое, показатель эффективности, средняя абсолютная ошибка [1, 2]. Если результаты прогнозов нельзя сравнить с тестовыми данными, необходимо использовать другие метрики качества и надежности.

Материал и методы исследования

Проводится исследование возможности определения качества моделей машинного обучения путем использования статистических методов между несколькими результатами прогноза разных моделей. Исследование проводили на данных прогноза моделей машинного обучения, написанных на языке Python. Обучающая выборка взята с официального интернет-ресурса «Федеральная служба государственной статистики» [3]. Признаком для модели являются данные объема инновационных товаров, работ, услуг;

в обучающую выборку взяты данные объема инновационных товаров, работ, услуг за 2017 г., в тестовую выборку взяты данные объема инновационных товаров, работ, услуг за 2018 г. Целевым признаком для модели являются данные инновационных товаров, работ, услуг со значительными технологическими изменениями в течение последних трех лет. В обучающую выборку взяты данные инновационных товаров, работ, услуг, вновь внедренных или подвергавшихся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет, за 2017 г.; в тестовую выборку взяты данные инновационных товаров, работ,

услуг, вновь внедренных или подвергавшихся значительным технологическим изменениям в течение последних трех лет, за 2018 г. Для исследования взяты изначально качественные модели машинного обучения, это подтверждается проверкой каждой модели на метрики качества – коэффициентом детерминации. Модели машинного обучения – лес решений, линейная регрессия и дерево решений [4]. Коэффициент детерминации линейной регрессии – 0,992, дерева решений – 0,991, леса решений – 0,983. Полный код построения моделей решений показан на рисунке. Результаты прогноза приведены в табл. 1.

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import r2_score
features_train= {'V':[10260.1,491.5,480.6,21732.2,213.6,651,3693061.6,603138.4,2995867, 272304.3,14149.4,3901.4,4915.8,390.2,14
4.4,14498.3,36599.1,11232.6,631765,184369.6,27016.8,75850.7,35067.7,305030.9,195299.7,173269.6,62599.6,110684.1,496438,332660.5,33
50.9,1959.9,2368.4,78929.6,15126.5]}
features_train=pd.DataFrame(data=features_train)

y_train= {'In':[8152.6,491.5,0.4,16211.2,213.6,512.1,2392416.2,231546.8,2077459.1,223993.3,10883.2,3901.4,4167,237.3,82.2,13737.
9,18823.5,4933.7,367952.5,116171.5,16440.4,39120.7,21948.1,192789.8,94311,120875.7,37102.5,63821.8,462583.8,260552.4,377.5,1188.5,
1463.5,69077.6,14332.6]}

features_test= {'V':[26356.7,846.7,88.2,40935.5,1047.5,284.5,3871481.1,663341,2986615.5,258561.5,16841.5,1274.8,5641.4,227.7,957
.4,8238.9,31946.1,10795.4,516784.2,159337.5,58728.5,73631.7,47266.6,336582.5,206604.6,186750.9,75653.8,99020.3,477300.8,384160.1,1
464.2,2684.5,26160.6,202922.3,18602.2]}

y_test={'In':[20743.8,23.6,88.2,27587.1,842.1,284.4,2497693.1,220309.7,2070895.3,203739,12544,1274.8,5150.8,194.8,143.8,3366.1,8932.6,8592.4,347476.6,-
95284.4, 56377,44047.2,36299.3,181959.2,161761.2,108849.8,42913.5,49658.2,373219.7,305956,326.6,2356.1,20472.1,192146,14342.1]}

y_train=pd.DataFrame(data =y_train)
features_test=pd.DataFrame(data=features_test)
y_test=pd.DataFrame(data =y_test)

model=LinearRegression()
model.fit(features_train, y_train)
pred=model.predict(features_test)
result= r2_score(y_test, pred)
print(np.round(pred,2))
print(result)

model_1 = DecisionTreeRegressor(random_state=12345,max_depth=10)
model_1.fit(features_train,y_train)
predictions_valid = model_1.predict(features_test)
result = r2_score(y_test,predictions_valid)
print(np.round(predictions_valid,2))
print(result)

model_2 =RandomForestRegressor(random_state=12345, n_estimators=100,max_depth=10)
model_2.fit(features_train,y_train)
predictions_valid_2 = model_2.predict(features_test)
result_2 = r2_score(y_test, predictions_valid_2)
print(np.round(predictions_valid_2,2))
print(result_2)
```

- Код построения моделей
- Model building code

- Таблица 1. Прогнозы моделей
- Table 1. Model predictions

Прогноз линейной регрессии		Прогноз дерева решений		Прогноз леса решений	
16728	6397,68	16440,4	4933,7	16988,9	6479,57
-207,01	342310	512,1	462583,8	488,57	383560
-711,56	105010,92	82,2	120875,7	139,75	115931
26406	38219,22	18823,5	37102,5	19696,9	38869,1
-73,7	48113,06	512,1	39120,7	488,57	44788,2
-580,02	30609,96	213,6	18823,5	207,85	21354,5
2569406	222679,27	2392416,2	260552,4	2153285	240822
439605	136390,32	367952,5	94311	340644	106010
1981967	123209,96	2077459,1	116171,5	2036751	114027
1708831	49455,48	223993,3	39120,7	210623	45688,1
1041153	64967,9	14332,6	63821,8	13932	61046,8
77,2	316098,5	512,1	462583,8	633,85	376042
2976,07	254264,8	4167	260552,4	3770,17	240822
-617,94	202,94	213,6	1188,5	187,69	976,26
-133,52	1013,06	512,1	1463,5	488,57	1358,45
4700,48	16598,23	8152,6	16440,4	6892,88	16988,9
20439,08	133945,74	21948,1	94311	20562,8	106010

Коэффициент альфа Кронбаха может применяться для определения надежности результатов машинного обучения разных моделей. Коэффициент альфа Кронбаха является статистическим методом оценки надежности измерений, который используется для проверки согласованности ответов на несколько вопросов или результатов нескольких тестов. Альфа Кронбаха определяет согласованность, совпадение оценки нескольких экспертов при анкетировании. Аналогичным способом можно определить изменение количественных данных с течением времени или при нескольких совокупностях результатов прогнозирования моделей машинного обучения. Альфа Кронбаха рассчитывается по формуле (1):

$$\alpha = \left(\frac{\kappa}{\kappa - 1} \right) \cdot \left[1 - \frac{\sum (s_i^2)}{s_{\text{сум}}^2} \right] \quad \alpha = \left(\frac{k}{k - 1} \right) \cdot \left[1 - \frac{\sum (s_i^2)}{s_{\text{сум}}^2} \right], \quad (1)$$

где s_i^2 – дисперсия для k отдельных позиций; $s_{\text{сум}}^2$ – дисперсия для суммы всех позиций [5, 6].

Проверка на различие сравниваемых величин проводится по t -критерию Стьюдента. Он используется для определения статистической значимости различий средних величин, может применяться в случаях сравнения независимых выборок. Критерий рассчитывается по формуле (2):

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (2)$$

где M_1 – средняя арифметическая первой сравниваемой совокупности; M_2 – средняя арифметическая второй сравниваемой совокупности; m_2 – средняя ошибка первой средней арифметической; m_1 – средняя ошибка второй средней арифметической.

Для определения t -критерия Стьюдента трех выборок данных необходимо произвести расчеты между каждыми выборками; получить матрицу t -критерия Стьюдента и вычислить определитель матрицы. Если он составит ноль, тогда единого t -критерия Стьюдента выявить не получится [7].

Значения результатов прогнозирования разных моделей можно сравнить с экспертной оценкой, так как каждая модель машинного обучения может считаться независимым экспертом. Мерой согласованности мнений экспертов является коэффициент конкордации. Число ранжируемых признаков соответствует числу значений каждого прогноза. Коэффициент конкордации рассчитывается по формуле (3):

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (3)$$

где S – сумма квадратов разностей рангов; m – число экспертов; n – число рассматриваемых фактов.

Если $W = 0$, это говорит о полной несогласованности мнений экспертов. Мнения экспертов согласованы при $W > 0,6$, а при $W = 1$ можно говорить о полной согласованности мнений экспертов.

Критерий Фишера, используемый для определения значимости математической модели, может применяться для определения значимости, из этого следует возможность проверки качества у модели машинного обучения без целевого признака тестовой выборки. Значения Фишера определяются для каждой модели отдельно, для этого используется признак тестовой выборки как фактор [8].

F -критерий Фишера предполагает выдвижение двух гипотез:

H_0 – дисперсия факторная равна остаточной дисперсии при одной степени свободы;

H_1 – дисперсия факторная больше остаточной дисперсии при одной степени свободы.

Табличные значения F -критерия Фишера при уровне значимости 0,05, 1-й степени свободы и количестве измерений 35 составляет 4,12.

Результаты исследования и их обсуждение

По формуле (1) были проведены расчеты альфы Кронбаха для результатов прогноза моделей машинного обучения. Результат составил 0,96, что соответствует превосходной надежности, согласованности данных.

По формуле (2) рассчитаны значения t -критерия Стьюдента для каждой пары выборок, матрица значений показана в табл. 2.

Определитель матрицы равен 0, значение t -критерия Стьюдента для каждой пары выборок

- Таблица 2. Матрица t -критериев Стьюдента
- Table 2. Student's t -criteria matrix

	Выборка № 1	Выборка № 2	Выборка № 3
Выборка № 1	0	-0,51797	-0,6413
Выборка № 2	0,517966	0	-0,11718
Выборка № 3	0,641298	0,11718	0

сравнивается индивидуально. Количество степеней свободы равно 68, $t_{\text{таб}}$ равно 1,995 при уровне значимости 0,05:

$$0,517966 < 1,995.$$

Различия между первой и второй выборками незначимы:

$$0,641298 > 1,995.$$

Различия между первой и третьей выборками незначимы:

$$0,11718 > 1,995.$$

Различия между второй и третьей выборками незначимы. Таким образом, различия между всеми тремя выборками незначимы, следовательно, достаточно похожие.

По формуле (3) вычислен коэффициент конкордации, который составил 389798434,52, что говорит о наличии высокой степени согласованности мнений экспертов или о данных, очень похожих между собой.

Критерий Фишера для модели линейной регрессии составил 93,99, что больше табличного значения критерия Фишера. Модель линейной регрессии можно считать значимой.

Критерий Фишера для модели дерева решений составил 3625,77, что больше табличного значения критерия Фишера. Модель дерева решений можно считать значимой.

Критерий Фишера для модели леса решений составил 2425,19, что больше табличного значения критерия Фишера. Модель леса решений можно считать значимой.

Заключение

В результате проведения исследования определены качества и надежность результатов прогнозирования разных моделей машинного обучения с использованием статистических методов. Однако необходимо также учитывать другие характеристики моделей, такие как точность прогнозирования, скорость обучения и другие факторы, которые могут влиять на их эффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Метрики и оценки: количественная оценка качества прогнозов. URL: <https://scikit-learn.ru/3-3-metrics-and-scoring-quantifying-the-quality-of-predictions/> (дата обращения: 20.03.2023).

2. Губко П. Метрики классификации и регрессии. URL: <https://academy.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii> (дата обращения: 08.04.2023).
3. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).
4. Основы линейной регрессии. URL: <https://habr.com/ru/post/514818/> (дата обращения: 20.03.2023).
5. Надежность и позиционный анализ. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/streliab.html> (дата обращения: 20.11.2022).
6. Флойд В. Альфа Кронбаха (α): что это такое и как используется в статистике. URL: <https://ru1.warbletoncouncil.org/alfa-de-cronbach-4917> (дата обращения: 20.11.2022).
7. Т-критерий Стьюдента для независимых совокупностей. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods.html> (дата обращения: 08.04.2023).
8. Точный критерий Фишера. URL: <https://medstatistic.ru/methods/methods5.html> (дата обращения: 08.04.2023).

REFERENCES

1. Metrics and estimates: quantitative assessment of the quality of forecasts. Available from: <https://scikit-learn.ru/3-3-metrics-and-scoring-quantifying-the-quality-of-predictions> [Accessed 20 March 2023].
2. Gubko P. Classification and regression metrics. Available from: <https://academy.yandex.ru/handbook/ml/article/metriki-klassifikacii-i-regressii> [Accessed 8 April 2023].
3. Federal state statistics service. Available from: <https://rosstat.gov.ru/> [Accessed 20 March 2023].
4. Fundamentals of linear regression. Available from: <https://habr.com/ru/post/514818> [Accessed 20 March 2023].
5. Reliability and positional analysis. Available from: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/streliab.html> [Accessed 20 November 2022].
6. Floyd V. Cronbach's Alpha (α): what is it and how is it used in statistics. Available from: <https://ru1.warbletoncouncil.org/alfa-de-cronbach-4917> [Accessed 20 November 2022].
7. Student's T-criterion for independent aggregates. Available from: <https://medstatistic.ru/methods/methods.html> [Accessed 8 April 2023].
8. Fisher's exact criterion. Available from: <https://medstatistic.ru/methods/methods5.html> [Accessed 8 April 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Винниченко Александра Валерьевна, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование и проектирование бережливых производственных систем, автоматизированные системы управления.

Истомина Юлия Павловна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – прогнозирование и моделирование методами машинного обучения.

Vinnichenko Alexandra V., Senior Lecturer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling and design of lean production systems, automated control systems.

Istomina Yulia P., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – forecasting and modeling by machine learning methods.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 11.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 28.04.2023

Проблемы применения показателей результативности и ключевых показателей эффективности для организационной системы

Станислав Анатольевич Назаревич¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлены проблемы применения показателей результативности; рассматриваются вопросы, возникающие в процессе механистического применения показателей результативности для контроля процессов и технологических операций в организационных системах. Приведены распространенные несоответствия и ошибки в сборке ключевых показателей эффективности и результативности и выявлены основные различия между ними. Представлены несколько форм для совершенствования методического аппарата по учету и администрированию показателей результативности и ключевых показателей эффективности, проведен анализ распространенности и упоминания в научных работах ключевых показателей эффективности с помощью анализа ключевых слов в научной базе Scopus.

Ключевые слова: результативность, ключевые показатели эффективности, организационная система, качество, процессы, проблемы выбора

Для цитирования: Назаревич С. А. Проблемы применения показателей результативности и ключевых показателей эффективности для организационной системы // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 16–22. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-16-22.

Original article

Problems of application of performance indicators and key performance indicators for an organizational system

Stanislav A. Nazarevich¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the problems of applying performance indicators, discusses issues arising in the process of mechanistic application of performance indicators to control processes and technological operations in organizational systems. Common inconsistencies and errors in the assembly of key performance and performance indicators are given and the main differences between them are identified. Several forms are presented for improving the methodological apparatus for recording and administering performance indicators and key performance indicators, an analysis was made of the prevalence and mention of key performance indicators in scientific papers using keyword analysis in the Scopus scientific database.

Keywords: performance, key performance indicators, organizational system, quality, processes, choice problems

For citation: Nazarevich S. A. Problems of application of performance indicators and key performance indicators for an organizational system. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):16–22. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-16-22.

Введение

Проблемы контроля и соответствия процессов плановым состояниям зависят от механизмов и подходов, заложенных в основание организационной системы. Именно тот принцип, по которому функционируют система контроля и механизмы, выбранные для реализации и воплощения тактики контроля операционной деятельности в технологических процессах производственной системы, проявляет соответствующие проблемы и ситуации, вызывающие

сопутствующие риски, характеризующие подобный выбор.

Традиционные способы контроля сводятся к использованию в процессах методик, устанавливающих плановые показатели выработки для выходов процессов и сравнение их с фактическими результатами. К ним относятся метод аудита, практика отчетных заседаний по результатам прошедшего квартала или месяца в зависимости от специфики и формы организации производственной системы, повсеместные хронометражи для верификации операционной функциональ-

ности существующего механизма или для перерасчета показателей с целью повышения установленного предела результативности для линейного персонала и другие инструменты и подходы к решению поставленных задач.

Существует также относительно новый подход, когда корпоративная культура устанавливает возможности для формирования собственных индивидуальных показателей, одобренных функциональным менеджментом. Тем самым должностным лицам предоставляется возможность самостоятельно формировать методические механизмы и шаги по реализации индивидуальных показателей. Подобные показатели верифицируются в установленном организационной системой порядке и чаще всего контролируются в конце месяца или квартала. При таком подходе получение свободы в выборе механизмов и методик достижения индивидуальной результативности, ограниченной лишь требованиями функционального менеджмента или рабочей группы, являются интересным решением, позволяющим раскрыть потенциал персонала.

Для контроля большинства подобных процессов используется метод индекса результативности, с помощью которого формируется суждение о целесообразности и рациональности распределения ресурсов для мотивации и стимулирования персонала организационной системы. Классические подходы, связанные с оценкой результативности и оценкой операционной деятельности с помощью аудита, мониторинга, летучего контроля и других видов инспекций на основании анализа отношения фактической деятельности к запланированной, дополняются популярным инструментом – ключевыми показателями эффективности (КПЭ) как частью и свободно применимым элементом системы сбалансированных показателей. Ключевые показатели эффективности уже достаточно долго используются многими компаниями, однако существует реальная проблема в релевантности целей применения и морфологии их сборки.

Материал и методы исследования

По статистике, большую часть актуальных проблем, связанных с контролем операционной деятельности в технологических процессах производственной системы, занимают причины, перечисленные в табл. 1.

Таким образом, КПЭ могут восприниматься как определенная настройка над существующими показателями результативности, такие решения вносят существенную неопределенность в пони-

- Таблица 1. Факторы, оказывающие влияние на процессы использования КПЭ в операционной деятельности
- Table 1. Factors influencing the processes of using KPI in operating activities

Проблема	Факторы
1. Сложности в разработке	Дифференциация различий между показателями результативности и эффективности. Подмена структурного содержания и целей применения
2. Интеграции ключевых показателей	Отсутствие или неполнота соответствующих протоколов и форм для учета и администрирования процесса интеграции КПЭ
3. Неточная формулировка	Неопределенность в формализованных документарных основаниях для введения
4. Непонимание целевого применения	Использование лишь как фактора дополнительного контроля и инструмента прозрачной мотивации и стимулирования выполнения плана
5. КПЭ формируются как надстройка к показателям результативности	КПЭ без учета влияния на основные элементы системы сбалансированных показателей (ССП) – финансов, клиентов, процессов, обучения, окружающей среды. Если КПЭ не оказывают влияния на все базовые элементы ССП, они могут считаться дополнительной надстройкой для показателей результативности

вание самого процесса создания КПЭ и создание показателей результативности процесса. Также достаточно распространено суждение о том, что ключевой показатель эффективности – это некая процентная настройка к показателям результативности, которая должна демонстрировать тенденцию к достижению планового показателя. Подобные практики встречаются достаточно часто. В табл. 2 приведен фрагмент протокола для использования подобных настроек.

Проблемы контроля процессов на основании показателей результативности связаны со сложностью их оперативного изменения. В некоторых

- Таблица 2. Фрагмент формы для учета показателей результативности
- Table 2. Fragment of the form for recording performance indicators

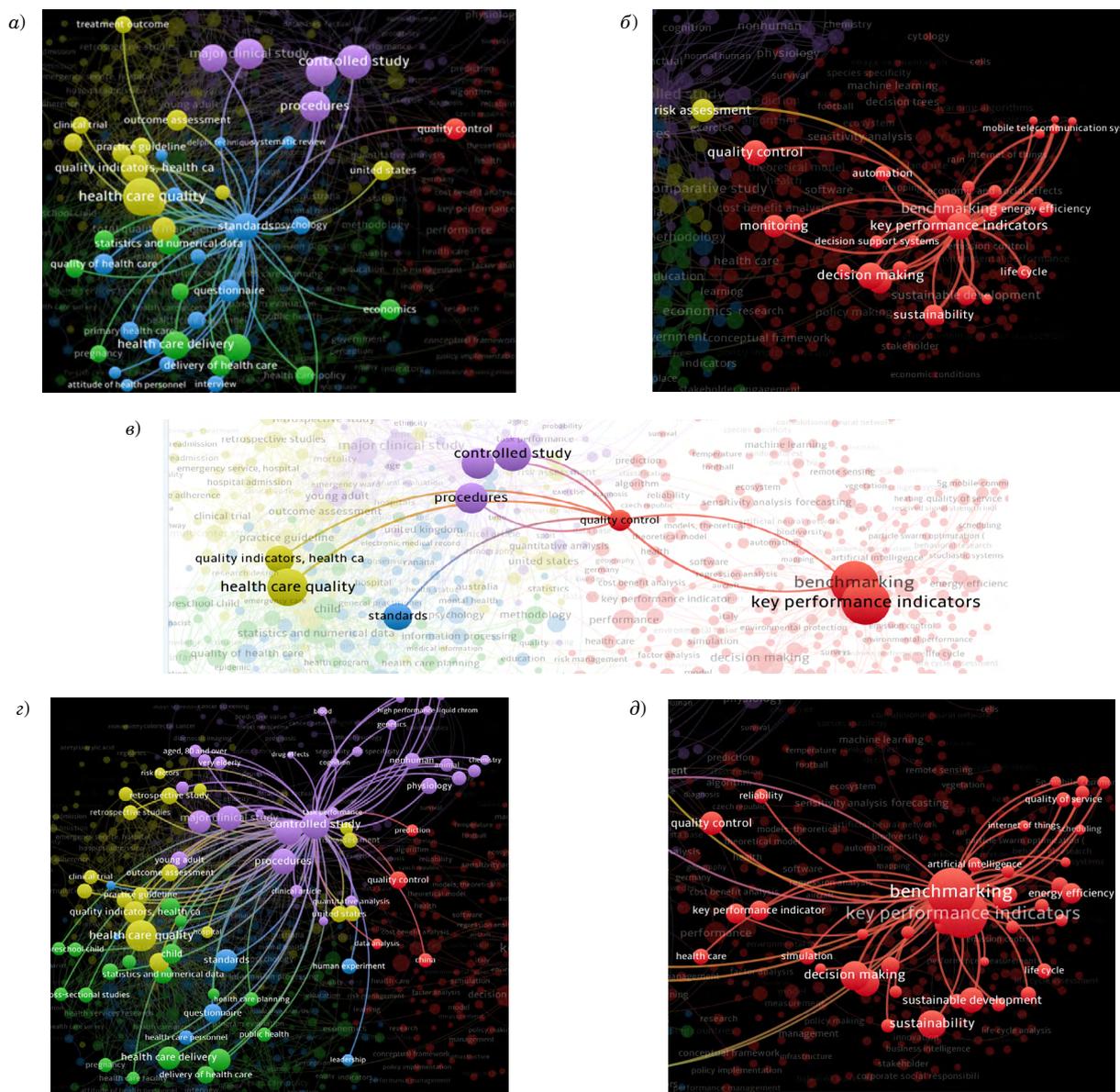
Показатель	Вес, %	Шкала			Оценка
		1	2	3	
Количество	0,25	Низко	Средне	Хорошо	2
Качество	0,5	Низко	Средне	Хорошо	3
Срок	0,25	Низко	Средне	Хорошо	3

На рис. 1 сформировано около пяти четко выраженных областей для формирования устойчивого мнения, что применение КРІ возможно в таких сферах, как стандартизация (рис. 2, а), мониторинг (рис. 2, б), контроль качества (рис. 2, в), риск-менеджмент, процедуры (рис. 2, г), бенчмаркинг (рис. 2, д), и исследованиях, посвященных практике реализации КРІ.

Следовательно, репрезентативность применимости показателей КРІ подтверждается успешностью их применения и масштабом внедрения в различных сферах деятельности и отраслях промышленности.

Результаты исследования и их обсуждение

Каким же образом не допустить распространенных ошибок при формировании ключевых показателей эффективности и добиться четкого и релевантного соответствия установленных показателей фактическому результату? Для этого нужно обратиться к некоторым элементам, составляющим целостность системы менеджмента качества, – документам, описывающим процессы внутри цепочки создания ценности, а именно – нужно проанализировать карту процесса.



• Рис. 2. Применение КРІ в различных сферах: а – стандартизация; б – мониторинг; в – контроль качества; г – процедуры; д – бенчмаркинг
 • Fig. 2. Application of KPI in various fields: а – standardization; б – monitoring; в – quality control; г – procedures; д – benchmarking

Структурно карта процесса имеет следующие особенности: в ней представлены как цель процесса, так и определение процесса, показатели результативности и эффективности, контрольные параметры процесса – с их помощью возможно установить такое достаточное количество индикаторов, которое позволило бы контролировать достижение цели процесса.

В практической ситуации КРІ характеризуют путь к успешной деятельности – пример практической формы для учета показателей приведен в табл. 3.

Форма учета, приведенная в табл. 3, широко используется в практической деятельности. В качестве дополнения для контроля расхода ресурсов можно включить в учет критерии для контроля эффективности процесса. Форма, представленная в табл. 4, рекомендована для организацион-

ных систем, использующих практику применения опережающих и запаздывающих показателей. Запаздывающий показатель характеризует результаты совершенной работы, повлиять на которые невозможно. Опережающие показатели характеризуют успешность хода процесса, оперативный контроль которых позволит снизить риск-факторы для результатов процесса.

Форма, представленная в табл. 5, используется в гибридном сочетании показателей результативности и ключевых показателей эффективности, также присутствуют индикаторы производственной деятельности, которые можно применять для контроля и отображения изменений контролируемого параметра или процесса в наиболее удобной форме. Самыми распространенными формами являются дашборды или любая индикация на дисплее.

- Таблица 3. Фрагмент формы для учета показателей в отделе технического контроля
- Table 3. A fragment of the form for recording indicators in the technical control department

Наименование подразделения	Отдел технического контроля			
Номер процесс-ной цепочки	ключевые показатели эффективности	производственные параметры процесса подразделения	результатирующие показатели подразделения	цель процесса
2	Число изделий, проверенных с опозданием Число изделий, пришедших на проверку с опозданием Число дефектных изделий, не замеченных в ходе проверки	Время процесса; число сотрудников структуры; стоимость проверки одной детали; время проверки одного изделия	Отношение числа проверенных изделий к числу дефектных изделий	Передача качественных изделий для процессов производства в следующее подразделение

- Таблица 4. Фрагмент формы для контроля процесса управления продукцией, не соответствующей требованиям
- Table 4. A fragment of the form for controlling the process of managing non-conforming products

Процесс	Показатель	Единица измерения	Результат/критерий
Управление не соответствующей требованиям продукцией	Максимально допустимое время на решение критических несоответствий	12 ч	Устранение негативного эффекта за 12 ч/ неустранение негативного эффекта за 12 ч
КРІ			
КРІ – опережающие показатели: – % несоответствий, не взятых в работу в течение 2 ч; – % непринятых решений по несоответствиям старше одного дня; – % несоответствий, перенаправленных другому специалисту более трех раз; – среднее число несоответствий на одного специалиста			
КРІ – запаздывающие показатели: – количество несоответствий за квартал; – % несоответствий, перенаправленных другому специалисту более трех раз в прошлом месяце; – % несоответствий, не решенных за прошлый месяц			

- Таблица 5. Фрагмент формы для контроля процесса реализации образовательной услуги
- Table 5. A fragment of the form for monitoring the process of implementing an educational service

Объект	Цель	Показатели результативности	Показатели эффективности
Процесс реализации образовательной услуги	Обеспечить все свободные услуги занятостью клиентам в соответствии с их аутентичным видением ее содержания	Количество программ с полным набором клиентов	Срок заполнения к первому приказу
		Количество клиентов, не отказавшихся по результатам реализации программ	
Показатели ключевой эффективности/показатели успеха			
Количество переговоров с неопределившимися клиентами		Количество переговоров в день о желании выбрать программу	
Индикаторы производственной деятельности			
Количество документов, поданных за день	Количество неопределившихся клиентов	Средняя загрузка программы в день	
Показатели производственной деятельности			
Количество поданных оригиналов	Количество поданных документов при помощи сотрудника	Количество зарегистрированных клиентов	

Заключение

Решение проблем применения показателей результативности и ключевых показателей эффективности для организационной системы – долгий и стратегический процесс трансформации организационной системы к гибкому и синхронизированному производству. Тактика учета и администрирования показателей результативности позволит не только повысить общую результатив-

ность производственной системы, но также выведет корпоративную культуру на новый уровень организованности. Если использовать ключевые показатели эффективности в гибридном сочетании с плановыми показателями результативности, то на выходе получится гибкий и прозрачный механизм, способный нивелировать вызовы и максимально обеспечить устойчивость организационной системы во внешней среде.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Парментер Д. Э. Ключевые показатели эффективности: разработка, внедрение и применение решающих показателей / пер. с англ. А. Платонова. М.: Олимп-Бизнес, 2008. 258 с.
2. Друкер П. Ф. Практика менеджмента. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2015. 416 с.
3. Kaplan R. S., Norton D. P. The balanced scorecard – measures that drive performance // Harvard business review. 1992. Vol. 70.1. P. 71–79.
4. Kaplan R. S., Norton D. P. Linking the balanced scorecard to strategy // California management review. 1996. 322 p.
5. Панов М. М. Жизненный путь и цикл развития организации: монография. М.: ИНФРА-М, 2016. 98 с.
6. Захаров Н. В. Разработка модели построения системы KPI // Горный информац.-аналит. бюлл. (науч.-техн. журн.). 2016. № 3. С. 375–379.

REFERENCES

1. Parmenter D. E. Key performance indicators: development, implementation and application of decisive indicators; trans. from English A. Platonov. Moscow: Olymp-Business; 2008. 258 p. (In Russ.).
2. Drucker P. F. Practice of management. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber; 2015. 416 p. (In Russ.).
3. Kaplan R. S., Norton D. P. The balanced scorecard – measures that drive performance. Harvard business review. 1992;70.1:71–79.
4. Kaplan R. S., Norton D. P. Linking the balanced scorecard to strategy. California management review. 1996. 322 p.
5. Panov M. M. Life path and organization development cycle: monograph. Moscow: INFRA-M; 2016. 98 p. (In Russ.).

6. Zakharov N. V. Development of a model for building a KPI system. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2016;(3):375–379. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Назаревич Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оценка технического уровня, анализ состояния организационных систем.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Nazarevich Stanislav A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – assessment of the technical level, analysis of the state of organizational systems.

Received 11.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья

УДК 004.415.25+004.413.2

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-23-29

Повышение производительности веб-приложений на Asp.NETCore

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

Илья Андреевич Воропаев¹

✉ ia_voropaev@guap.ru, orcid.org/0000-0003-1291-3694

Михаил Николаевич Давиденко¹

dudos0241@mail.ru, orcid.org/0000-0001-8204-8590

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Приводятся рекомендации по разработке веб-приложений, которые помогут улучшить производительность и качество продукта. Рассматриваются особенности языка программирования C# и фреймворка Asp.NETCore, влияющие на быстрдействие приложения. Проводится тестирование и сравнение рассматриваемых методов с помощью RestAPI – для реализации рассматриваемых методов, Postman – для взаимодействия с API и сравнения полученных результатов по времени отклика.

Ключевые слова: RestAPI, C#, Asp.NETCore, брокер сообщений, производительность веб-приложения

Для цитирования: Солёный С. В., Воропаев И. А., Давиденко М. Н. Повышение производительности веб-приложений на Asp.NETCore // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 23–29. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-23-29.

Original article

Improving the performance of Asp.NETCore web applications

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

Ilya A. Voropaev¹

✉ ia_voropaev@guap.ru, orcid.org/0000-0003-1291-3694

Mikhail N. Davidenko¹

dudos0241@mail.ru, orcid.org/0000-0001-8204-8590

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article contents advices for developing a web application that will help improve the performance and quality of the product. Introduces the features of the C# programming language and the Asp.NETCore framework that affect the performance of the application. The methods of optimisation shown in this article were tested and compared on the architecture of RestAPI. Postman was used for comparison of time of the responses fulfilment. Postman also used for the generation of responses to the RestAPI.

Keywords: RestAPI, C#, Asp.NETCore, message broker, web application performance

For citation: Solyonyj S. V., Voropaev I. A., Davidenko M. N. Improving the performance of Asp.NETCore web applications. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(4):23–29. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-23-29.

Введение

В мире языков программирования часто находят свое место языки, получающие наибольшую поддержку не только со стороны экспертного и пользовательского сообщества, но и со стороны разработчиков языка. В этом отношении язык и инфраструктура C# и .NET-приложений – это беспрецедентный инструмент по причине поддержки структур языка одним из самых крупных игроков ИТ-рынка – компанией *Microsoft* – и наличия в составе языка и сообщества разработчиков open-source-продуктов, базирующихся на

технологиях и кадрах из компании *Microsoft*. Количество разработанных и внедренных систем на данном стеке технологий исчисляется сотнями миллионов в различных странах. Даже в российском государственном секторе, несмотря на сложность ситуации с необходимостью замещения импортных решений, ситуация все еще остается неоднозначной: согласно данным официального сайта «Единой информационной системы в сфере закупок», в государственном секторе все еще активно производятся закупки услуг по сопровождению сайтов и порталов на базе технологий Asp.NET и .NETCore, как и закупка услуг по

разработке сайтов на данном стеке технологий. Данная статистика показывает, что в России поддерживаются общие тенденции разработки программных решений на языке C#, который уже много лет находится в пятерке самых часто применяемых для разработки программного кода языков (от 11,2 до 20 % от общего числа разрабатываемых веб-решений с 2019 по 2022 г.).

Таким образом, тематика данной статьи является актуальной в концепции развития существующих онлайн-сервисов как в государственном секторе России, так и в секторе коммерческой разработки программных продуктов. Далее приведены способы оптимизации разрабатываемого программного кода на C# при разработке .NET-приложений и информационных систем, а также результаты исследования результативности рассматриваемых методик на тестовых программных продуктах. Производительность веб-приложения относится к качеству и эффективности функционирования веб-приложения. Согласно исследованиям интернет-маркетологов, время, проводимое пользователями на сайте от момента перехода на портал до момента потери интереса к представленному контенту, составляет около 3 с [1]. Большинство поисковых систем также проводят автоматизированную аналитику и поднимают в поиске оптимизированные для персональных компьютеров и мобильных устройств, наиболее быстрые по отклику веб-сайты.

Применение рассматриваемых нами методик позволяет повысить производительность веб-приложений на Asp.NETCore. В статье также приведены результаты тестирования и сравнения указанных методов с помощью RestAPI – для реализации рассматриваемых методов, Postman – для взаимодействия с API и сравнения полученных результатов по времени отклика.

Последняя версия .NET

Каждая версия поставляется с новым обновлением, расширенными функциями и улучшенной производительностью. Например, в .NETCore 2.1 добавлены JIT-компилятор, поддержка ском-

пилированных регулярных выражений, тогда как в версии 2.2 есть поддержка HTTP/2. Asp.NETCore 3.0 предлагает быстрое чтение и запись в память устройства, возможность выгрузки сборки и многое другое. В ядре Asp.NET5 представлены многочисленные новые функции, такие как Text.JSON, поддержка типов записей C#9 и улучшение работы модели MVC и пр. [2]. Последняя версия .NETCore 6 была выпущена 8 ноября 2021 г. с упрощенной обработкой и оптимизированными возможностями производительности. Благодаря таким функциям, как «горячая» перезагрузка, интеллектуальное редактирование кода и поддержка VisualStudio 2022, разработка полнофункционального программного обеспечения упрощается.

Таким образом, при создании приложений с использованием ядра Asp.NET всегда отдается предпочтение последней версии ядра Asp.NET, поскольку Microsoft всегда повышает производительность последней версии по сравнению с предыдущей.

Синхронные вызовы

При разработке приложений Asp.NETCore рекомендуется избегать создания синхронных методов, если предполагается, что метод будет требовать больших вычислительных мощностей. Это приведет к блокирующему вызову, что означает вызов, который блокирует следующее выполнение до тех пор, пока оно не будет завершено. Блокирующий или синхронный вызов может быть чем угодно – извлечением данных из API или выполнением каких-либо внутренних операций. Рекомендуется реализовывать методы асинхронными.

Проверим время отклика синхронного и асинхронного методов с помощью программы Postman, отправляя GET-запрос к контроллеру, который вызывает соответствующий метод (рис. 1). Реализация методов идентична, кроме конструкции «async/await» в асинхронном методе.

Получаем следующие данные:

- время отклика у синхронного метода – 5015 мс;
- время отклика у асинхронного метода – 2022 мс.



- Рис. 1. Время отклика у синхронного и асинхронного методов
- Fig. 1. Response time of synchronous and asynchronous methods

Конкатенация строк в циклах

При реализации в цикле конкатенации строк происходит создание большого числа временных объектов. Это приводит к выделению большого объема памяти и может значительно замедлять работу приложения. Чтобы избежать этого, рекомендуется использовать класс `StringBuilder`, увеличивая быстродействие приложения.

Протестируем два метода, в которых реализовано чтение текстового файла построчно и образование строки конкатенацией в одном и с помощью `StringBuilder` в другом методе. Реализация методов идентична, кроме образования строки. С помощью программы Postman, отправляя GET-запрос к контроллеру, который вызывает соответствующий метод, получим время отклика для каждого (рис. 2):

- время отклика у метода с конкатенацией строк – 6079 мс;
- время отклика у метода со `StringBuilder` – 518 мс.

Task.Wait и Task.Result с асинхронным программированием

При работе с асинхронным программированием рекомендуется избегать использования `Task.Wait` и `Task.Result` и использовать ключевое слово «await» по следующим причинам:

1) они блокируют поток до тех пор, пока задача не будет завершена, и ждут завершения задачи. `Task.Wait` синхронно блокирует поток до завершения задачи;

2) `Task.Wait` и `Task.Result` заключают исключения любого типа в `AggregateException` и усложняют обработку исключений. При применении «await» вместо `Task.Wait` и `Task.Result` обработка исключений вызывает меньше вычислительных затрат.

`Task.Wait` и `Task.Result` можно использовать только в том случае, если в программе реализуется параллельное выполнение задачи. Не рекомендуется использовать их с асинхронным программированием [2].

GET String	http://localhost:9643/test/str	/ String	200 OK	6079 ms	191 B
This request does not have any tests.					
GET StringBuilder	http://localhost:9643/test/strb	/ StringBuilder	200 OK	518 ms	191 B
This request does not have any tests.					

- Рис. 2. Время отклика у метода с конкатенацией строк и метода со `StringBuilder`
- Fig. 2. Response time for a method with string concatenation and a method with `StringBuilder`

Выполнение операции ввода/вывода асинхронно

Выполняя операции ввода/вывода, следует делать это асинхронно, чтобы исключить влияние на другие процессы. Операции ввода/вывода означают выполнение некоторых действий с файлом, например, загрузку или извлечение файлов. Если выполнить это синхронно, блокируется основной поток и останавливается другое фоновое выполнение до тех пор, пока ввод/вывод не завершится. Таким образом, с точки зрения производительности рекомендуется использовать асинхронное выполнение для операций ввода/вывода.

Существует множество асинхронных методов, доступных для операций ввода/вывода, таких как `ReadAsync`, `WriteAsync` и т. д.

Кэширование

Чтобы повысить производительность приложения, применяется общеизвестный прием – снижение числа запросов, отправляемых на сервер. Исполнение вызова и отправка его на сервер вызывают процесс сохранения полученного ответа в кэш. Таким образом, когда в следующий раз будет сделан вызов для аналогичного ответа, вместо запроса к серверу данные сверяются с сохраненными данными, и, если они совпадают, данные извлекаются оттуда, а не вызываются от сервера.

Таким образом, кэширование экономит время и повышает общую производительность, сокращая число вызовов сервера. `AspNetCore` обеспечивает различное кэширование – кэширование в памяти, кэширование ответов, распределенное кэширование и т. д. [3].

Оптимизация доступа к данным

Чтобы повысить производительность приложения, следует оптимизировать логику доступа к данным. Поскольку данные извлекаются из

базы данных, их выборка каждый раз занимает много времени. Вот несколько методов, которые рекомендуется использовать для повышения производительности приложения:

- 1) сократить число HTTP-вызовов, т. е. число сетевых обращений;
- 2) вместо нескольких запросов к серверу рекомендуется получить все необходимые данные за один или два вызова;
- 3) реализация вызова данных из кэша для неизменных данных;
- 4) не стоит извлекать данные раньше времени, если это не требуется. Это увеличивает нагрузку на сервер, и, таким образом, работа приложения замедляется.

Оптимизирование пользовательского кода

Оптимизация кода и бизнес-логики помогает повысить производительность приложений. Рекомендации:

- 1) оптимизация ведения журнала, аутентификации или части пользовательского обработчика, который выполняется при каждом запросе;
- 2) не следует использовать длительные пользовательские исполнения на логическом уровне или промежуточном программном обеспечении, так как это блокирует запрос к серверу, тем самым увеличивая время выборки данных для приложения. Вместо этого можно оптимизировать код либо на стороне клиента, либо на стороне сервера;
- 3) выполнение длительных задач асинхронно, чтобы не затрагивать другие задачи [4].

Использование сериализации JSON

Asp.NETCore 6.0 использует System.Text.Json для сериализации в JSON и десериализации в объекты. Это означает, что возможно читать и писать JSON асинхронно, не дожидаясь выполнения других процессов. Рекомендуется использовать System.Text.Json, так как он повышает производительность лучше, чем Newtonsoft.Json. Кроме того, пространство имен System.Text.Json обеспечивает высокую производительность, низкое выделение, сериализацию объектов в текст JSON и десериализацию текста JSON в объекты. Теперь вместо сериализации строковых методов можно производить сериализацию объектов с помощью массива UTF-8. Этот метод примерно на 5–10 % быстрее в исполнении.

Минимизирование исключений

Создание и перехват исключений происходит медленнее, чем другие аналогичные шаблоны кода. Следовательно, они должны использоваться редко и не должны использоваться для контроля нормального выполнения программы [5]. Для оптимизации следует:

- 1) применять алгоритм для обнаружения и обработки условий, вызывающих исключения;
- 2) применять операторы типа «throw» или «catch» для необычных или неожиданных условий.

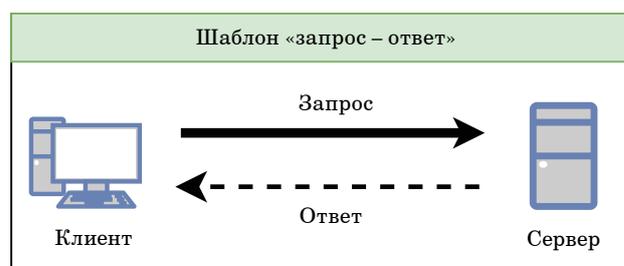
Брокер сообщений

Брокер сообщений – это посредник, через который проходят все сообщения. Тем самым достигается дополнительная развязка между передатчиком и приемником. Отправитель направляет сообщение брокеру сообщений, а брокер сообщений передает его получателю. Ключевым преимуществом здесь является то, что брокеру сообщений не нужно знать, где в сети находится потребитель.

Помимо стиля общения «запрос – ответ», существует еще много других, но это один из самых распространенных. В этом шаблоне одна система выступает в роли клиента, а удаленная система – в роли сервера. Как показано на рис. 3, клиент запрашивает данные с сервера.

Этот тип связи подходит, когда клиенту нужен прямой ответ или задача должна быть выполнена немедленно. Но данный тип связи является синхронным из-за особенностей его реализации, что может негативно сказаться на оптимизации программного кода и скорости его выполнения.

Для разработчика этот паттерн прост в реализации, но он также обеспечивает жесткую связь систем.



- Рис. 3. Шаблон обмена сообщениями «запрос – ответ»
- Fig. 3. “Request – response” messaging template

Шаблон обмена очередями сообщений

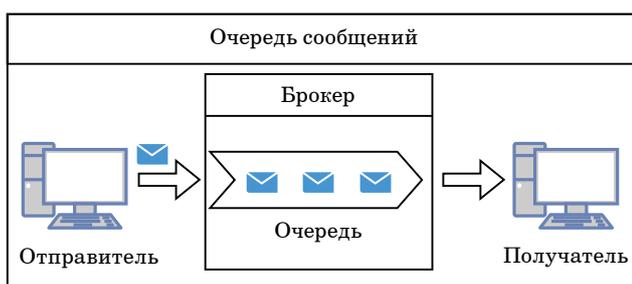
В шаблоне обмена очередью сообщений (рис. 4) две системы действуют асинхронно. Это работает через так называемые сообщения. Одна система публикует сообщение в очереди сообщений, а получатель принимает это сообщение из очереди. При таком виде общения отправитель сообщения не ждет прямого ответа [6].

В отличие от шаблона «запрос – ответ», в данном случае обе системы действуют как издатели и потребители. Как видно из рис. 4, таким образом мы получаем слабосвязанную архитектуру. И это одно из самых значительных преимуществ использования очередей сообщений. В результате системам больше не нужно знать местоположение друг друга. Такое разделение систем позволяет разрабатывать их независимо. Использование брокера сообщений является оптимальным решением, когда есть задачи, требующие времени и ресурсов, и когда ответ на запрос не требуется получить немедленно.

Применение брокеров сообщений

Рассмотрим варианты использования брокеров сообщений.

1. *Микросервисы*. Когда для построения системы используется микросервисная архитектура, в конце разработки может быть несколько микросервисов. Может возникнуть проблема в общении друг с другом. Брокер сообщений можно использовать в качестве центрального брокера, а микро-



- Рис. 4. Шаблон обмена очередями сообщений
- Fig. 4. Message queue exchange pattern

сервисы могут взаимодействовать друг с другом [7, 8].

2. *RestAPI*. В настоящее время часто реализуются веб-интерфейсы или мобильные приложения с RestAPI. В случае, если во время работы у пользователя возникнет проблема с подключением к Интернету, ответ от сервера может никогда не дойти до конечной точки. Здесь можно использовать брокер, чтобы гарантировать доставку сообщения.

3. *Мобильные приложения*. Данная технология будет полезна, если ключевая задача заключается в отправке уведомлений в мобильном приложении, но некоторые пользователи в этот момент не в сети. Применение брокера сообщений может гарантировать, что пользователи получат уведомление, когда восстановят соединение с сетью [9].

4. *Обработка данных устройств IoT (Интернет вещей)*. Устройства IoT генерируют много данных, и при этом в системе могут быть тысячи устройств. Несмотря на то, что в системе могут быть использованы протоколы HTTP для обработки этих данных, это не лучшая практика в связи с низкой безопасностью данных решений. Из-за большого объема данных и скорости их создания брокер сообщений идеально подойдет для этой задачи, повышая отказоустойчивость системы.

Заключение

Реализация представленного набора методов приводит к значительной оптимизации разрабатываемого программного кода и снижению числа используемых для работы приложений ресурсов, что было доказано практическими тестами, проведенными в процессе исследования. Реализация программных кодов и приложений в виде микросервисов с помощью брокеров сообщений позволяет не только получить масштабируемую систему, но и значительно повысить уровень защищенности данных посредством обеспечения возможности добавления к существующим решениям дополнительных обработчиков систем шифрования данных и протоколов безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин Н. А., Орехов Е. Е., Ильин Д. В. Тепловые карты сайта // Информатика и вычислительная техника: сб. науч. тр. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 177–181.
2. 10 tips that can improve the performance of .Net web applications. URL: <https://www.castsoftware.com/blog/10-tips-that-can-improve-the-performance-of-net-web-applications> (дата обращения: 10.12.2022).

3. Best practices to improve Asp.NETCore performance. URL: <https://www.biztechcs.com/blog/asp-net-core-performance-best-practices/> (дата обращения: 10.12.2022).
4. 10 tips to improve performance of Asp.NETCore core application. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/article/10-tips-to-improve-performance-of-asp-net-core-application/> (дата обращения: 10.12.2022).
5. How to optimize your website speed by improving the backend. URL: <https://rubygarage.org/blog/website-speed-optimization-backend> (дата обращения: 10.12.2022).
6. Message broker – complete know-how, use cases and a step-by-step guide. URL: <https://tsh.io/blog/message-broker> (дата обращения: 10.12.2022).
7. Why do we need RabbitMQ. URL: <https://betterprogramming.pub/why-do-we-need-rabbitmq-f9f1d99c074c> (дата обращения: 10.12.2022).
8. Microservices – why use RabbitMQ. URL: <https://www.cloudamqp.com/blog/why-use-rabbitmq-in-a-microservice-architecture.html#:~:text=RabbitMQ%20is%20therefore%20ideal%20for,them%20to%20consumers%20when%20ready> (дата обращения: 10.12.2022).
9. Introduction to message brokers. URL: <https://hasithas.medium.com/introduction-to-message-brokers-c4177d2a9fe3> (дата обращения: 10.12.2022).

REFERENCES

1. Nikitin N. A., Orekhov E. E., Ilin D. V. Heat maps of the site. Informatics and computer engineering. Coll. of scient. artic. Cheboksary: Chuvash University Publishing House; 2021, pp. 177–181. (In Russ.).
2. 10 tips that can improve the performance of .Net web applications. Available from: <https://www.castsoftware.com/blog/10-tips-that-can-improve-the-performance-of-net-web-applications> [Accessed 10 December 2022].
3. Best practices to improve Asp.NETCore performance. Available from: <https://www.biztechcs.com/blog/asp-net-core-performance-best-practices/> [Accessed 10 December 2022].
4. 10 tips to improve performance of Asp.NETCore core application. Available from: <https://www.c-sharpcorner.com/article/10-tips-to-improve-performance-of-asp-net-core-application/> [Accessed 10 December 2022].
5. How to optimize your website speed by improving the backend. Available from: <https://rubygarage.org/blog/website-speed-optimization-backend> [Accessed 10 December 2022].
6. Message broker – complete know-how, use cases and a step-by-step guide. Available from: <https://tsh.io/blog/message-broker> [Accessed 10 December 2022].
7. Why do we need RabbitMQ. Available from: <https://betterprogramming.pub/why-do-we-need-rabbitmq-f9f1d99c074c> [Accessed 10 December 2022].
8. Microservices – why use RabbitMQ. Available from: <https://www.cloudamqp.com/blog/why-use-rabbitmq-in-a-microservice-architecture.html#:~:text=RabbitMQ%20is%20therefore%20ideal%20for,them%20to%20consumers%20when%20ready> [Accessed 10 December 2022].
9. Introduction to message brokers. Available from: <https://hasithas.medium.com/introduction-to-message-brokers-c4177d2a9fe3> [Accessed 10 December 2022].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизация, робототехника, электроэнергетика.

Воропаев Илья Андреевич, ассистент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, Director at the School of Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automation, robotics, electric power industry.

Воропаев Пиа А., Assistant at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Область научных интересов – информационная безопасность, безопасность информационных систем, архитектура информационных систем, распределенные информационные системы, децентрализованные информационные системы.

Давиденко Михаил Николаевич, студент кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – информационная безопасность, программирование, безопасность информационных систем.

Поступила в редакцию 02.03.2023

Поступила после рецензирования 09.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Research interests – information security, security of information systems, architecture of information systems, distributed information systems, decentralized information systems.

Davidenko Mikhail N., Student at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – information security, programming, security of information systems.

Received 02.03.2023

Revised 09.03.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья
УДК 623.76

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-30-40

Амплитудный метод определения параметров движения малоразмерных роботизированных комплексов

Константин Вадимович Ланцов¹

stawrkest999@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6550-023

Валентин Вадимович Ланцов¹

well999@list.ru, orcid.org/0000-0002-3168-0286

Александр Викторович Корякин¹

koral.spb@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-3845-9277

Любовь Александровна Мартынова²

✉ martynowa999@bk.ru, orcid.org/0000-0002-5613-0838

¹ Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена задача обнаружения малоразмерного робототехнического комплекса с использованием недорогого мобильного малогабаритного средства обнаружения с поворотной антенной. Целью исследования явилось определение параметров движения и координат малоразмерного робототехнического комплекса по результатам последовательной оценки пеленгов на него. Разработан метод определения курса движения малоразмерного робототехнического комплекса по трем пеленгам, последовательно получаемым наиболее простым и помехозащищенным амплитудным способом. Сформировано трансцендентное уравнение и приведено его решение. По полученному курсу в результате решения уравнения определены скорость и координаты положения малоразмерного робототехнического комплекса в моменты его обнаружения. Для тестирования разработанного метода сформирована математическая имитационная модель функционирования поворотной антенны, движения робототехнического комплекса и обработки информации с реализацией разработанного метода. Результаты численного эксперимента показали работоспособность предложенного метода определения курса робототехнического комплекса. Для снижения ошибки определения курса предложено использовать фильтр Калмана, что позволило сократить погрешность определения курса в три раза. Предложенный метод позволяет как усилить защиту наземного охраняемого объекта, так и обеспечить безопасность морского автономного необитаемого подводного аппарата дальнего плавания от малоразмерных морских робототехнических комплексов.

Ключевые слова: малоразмерный робототехнический комплекс, дальность обнаружения, безопасность объекта, поворотная антенна, режим шумопеленгования, амплитудный метод

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-29-00803.

Для цитирования: Ланцов К. В., Ланцов В. В., Корякин А. В., Мартынова Л. А. Амплитудный метод определения параметров движения малоразмерных роботизированных комплексов // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 30–40. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-30-40.

Original article

Amplitude method for determining the motion parameters of small-sized robotic systems

Konstantin V. Lantsov¹

stawrkest999@mail.ru, orcid.org/0000-0002-6550-023

Valentin V. Lantsov¹

well999@list.ru, orcid.org/0000-0002-3168-0286

Alexandr V. Koryakin¹

koral.spb@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-3845-9277

Lyubov A. Martynova²

✉ martynowa999@bk.ru, orcid.org/0000-0002-5613-0838

¹ State Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg, Russian Federation

² Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The problem of detecting a small-sized robotic complex using an inexpensive mobile small-sized detection tool with a rotary antenna is considered. The aim of the study was to determine the motion parameters and coordinates of a small-sized robotic complex based on the results of a consistent assessment of bearings for it. A method has been developed for determining the course of movement of a small-sized robotic complex using three bearings, successively obtained by the simplest and noise-free amplitude method. A transcendental equation is formed and its solution is given. Based on the course obtained as a result of solving the equation, the speed and position coordinates of the small-sized robotic complex at the moments of its detection are determined. To test the developed method, a mathematical simulation model of the functioning of the rotary antenna, the movement of the robotic complex and information processing was formed with the implementation of the developed method. The results of the numerical experiment proved the operability of the proposed method for determining the course of the robotic complex. To reduce the error in determining the course, it is proposed to use the Kalman filter, which made it possible to reduce the error in determining the course by three times. The proposed method makes it possible to enhance the protection of both a ground protected facility and ensure the safety of a marine autonomous long-range uninhabited underwater vehicle from small-sized marine robotic systems.

Keywords: small-sized robotic complex, detection range, object safety, rotary antenna, noise direction finding mode, amplitude method

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-00803.

For citation: Lantsov K. V., Lantsov V. V., Koryakin A. V., Martynova L. A. Amplitude method for determining the motion parameters of small-sized robotic systems. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):30–40. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-30-40.

Введение

С появлением малоразмерных робототехнических комплексов (РТК) – беспилотных воздушных судов (БВС) в воздухе и автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) в морской среде, способных нести полезную нагрузку или вести фото- и видеосъемку, угрожающую безопасности объектов, и способных нанести этим объектам ущерб [1], – возникли задачи обеспечения их безопасности от малоразмерных РТК [2–8]. Обеспечение безопасности подразумевает, прежде всего, обнаружение РТК, определение параметров его движения и текущих координат.

Особенностями малоразмерных РТК являются:

- существенно меньшая эффективная площадь рассеяния (ЭПР), из-за чего многократно сокращается дальность обнаружения по сравнению с обитаемыми объектами под водой или большими РТК в воздухе. В связи с этим традиционные средства обнаружения больших БВС или обитаемых подводных объектов не обеспечивают требуемой дальности обнаружения, позволяющей оперативно принять меры для отведения малоразмерных БВС, воздействуя на их систему управления [9–12];

- высокая стоимость традиционных средств обнаружения (радиолокационных станций в воздухе [13–18] и гидроакустических комплексов под водой [19–23]) по сравнению с малоразмерными РТК, в связи с чем для обнаружения малоразмерных РТК целесообразно использовать сопоставимые по стоимости средства обнаружения РТК и соответствующие методы обработки полученной с их помощью информации;

- малое время нахождения малоразмерных РТК в зоне обзора средств обнаружения, как в воздухе, так и под водой, – из-за небольшой дальности их обнаружения.

Из-за значительного количества средств обнаружения, характеризующихся малой дальностью, они должны быть мобильными и несложными, сопоставимыми по стоимости с малоразмерными РТК, а алгоритмы обработки информации должны быть прозрачными, но защищенными. Из-за малой дальности обнаружения, с одной стороны, и из-за повышенных скоростей БВС – с другой, для увеличения дальности обнаружения может потребоваться размещение средств обнаружения в несколько эшелонов. Средства обнаружения должны быть достаточно недорогими, чтобы при вандализме или попадании в руки заинтересованных лиц материальные потери оказались бы минимальными.

При использовании для обнаружения РТК режима шумопеленгования (ШП) дальность обнаружения сигнала его модема невелика, так как приемные антенны размещаются на подручных средствах на незначительной высоте, в связи с чем, в свою очередь, прямая видимость существенно меньше потенциальной дальности обнаружения.

Шумопеленгование на всенаправленную антенну не позволяет определить пеленг, в связи с чем необходимо использовать направленные антенны.

Традиционно их располагают, ориентируя на разные направления, как и эхолоты в морской среде, однако при этом требуется большое количество антенн для сужения сектора обзора. Другим, более дешевым, способом является использование одной узконаправленной стационарной поворотной антенны. В работе рассмотрена одна из разновидностей поворотных антенн, вращающаяся по принципу «туда – обратно» в диапазоне 0–360°. Обнаружение РТК предлагается вести с использованием одной антенны амплитудным методом по максимуму уровня сигнала.

Амплитудный метод является самым дешевым в реализации и самым помехозащищенным в том смысле, что обнаружение происходит по максимуму при направлении на источник. В отличие от определения пеленга по минимуму уровня сигнала, при пеленгации методом минимума или методом сравнения [13] диаграмма направленности (ДН) ориентирована так, что направление на объект проходит сбоку ДН, в результате чего происходит снижение уровня принимаемого сигнала. Достоинства метода максимума заключаются в относительно малом влиянии шумов на погрешность пеленгования, так как в направлении максимума ДН принимается максимально возможная энергия пеленгуемого сигнала; возможности разрешения нескольких источников излучения с разными азимутами в одном частотном канале; недорогой реализации, поскольку может использоваться только одноканальный приемник. Погрешность пеленгаторов из-за малой кривизны ДН вблизи максимума порядка одной пятой ширины ДН антенны на уровне 0,7 при узком полурастворе сектора обзора можно считать допустимой в рассматриваемой задаче.

К настоящему времени, как в радиолокации, так и в гидролокации, разработано достаточно большое количество методов, которые постоянно совершенствуются с развитием аппаратной части. Однако усовершенствованные методы, ориентированные на сложные аппаратные средства, оказываются непригодными для простых недорогих антенных устройств.

Так, отличительной особенностью методов обработки пеленгов для определения курса объекта и параметров его движения при пеленгации в гидролокации является использование фазированной антенной решетки (ФАР) [19–23], что является достаточно затратным аппаратным средством с точки зрения как стоимости материальной части, так и объема вычислительных ресурсов, необходимых для обработки сигналов от элементарных датчиков ФАР. Кроме того, при большом количестве данных существенно снижается оперативность их обработки, которая крайне актуальна из-за короткого времени нахождения РТК в зоне обзора антенны.

Имеющиеся методы без привязки к среде используют либо результаты оценки двух и более пространственно-разнесенных наблюдателей, либо данные маневрирования наблюдателя или цели, либо прогнозирование с использованием регрессионного анализа [24], либо расширение информационного пространства измерений с помощью радиотелескопов, позволяющих измерять не только угловые координаты, но и мощность сигнала от объекта.

С другой стороны, именно из-за простоты определения пеленга с использованием амплитудного метода по максимуму уровня сигнала публикации по определению координат и параметров движения РТК в литературе практически отсутствуют.

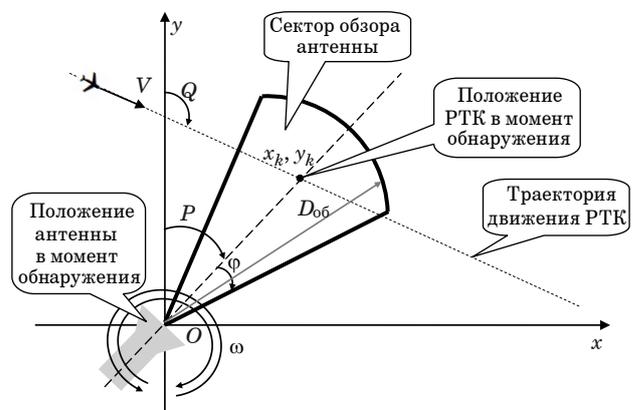
В связи с этим возникла задача определения координат и параметров движения РТК.

Цель исследования заключается в определении координат и параметров движения малоразмерных РТК по результатам последовательной оценки пеленгов на них.

Метод определения курса движения малоразмерного робототехнического комплекса

Введем неподвижную, связанную с положением антенны систему координат Oxy . Ось Oy направлена на Север, а ось Ox направлена вправо относительно оси Oy . Пусть равномерно и прямолинейно со скоростью V движется малоразмерный РТК курсом Q (рис. 1). Положение РТК в вертикальной плоскости предполагается постоянным.

Морская среда отличается тем, что с расстоянием из-за различной скорости звука происходит рефракция – изменение направления лучей, возникающее в морской среде с меняющимися свойствами (соленостью, температурой, давлением из-за нагревания морской поверхности Солнцем), в которой скорость распространения волны неодинакова. Однако поскольку дальности обнаружения морских РТК очень малы, то на таких расстояниях полагаем, что скорость распространения звука в воде постоянна.



• Рис. 1. Положение диаграммы направленности антенны в момент обнаружения движущегося робототехнического комплекса

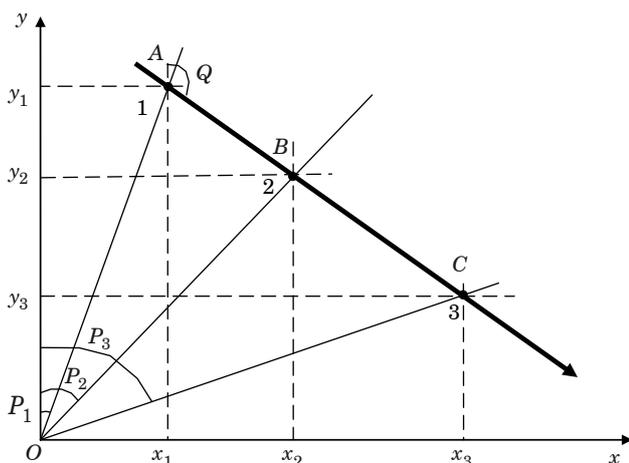
• Fig. 1. The position of the radiation pattern of the antenna at the time of detection of a moving robotic complex

Для уменьшения погрешности определения пеленга используем узкий сектор приема поворотной антенны и полагаем, что пеленг совпадает с направлением оси сектора; погрешность определения пеленга равна $\varphi/2$.

Пусть ДН антенны в виде сектора с углом полураствора φ вращается вокруг оси с угловой скоростью ω . Вращение происходит слева направо от 0 до 360° , затем справа налево от 360 до 0° и т. д.

Пусть в момент времени t_1 РТК с текущими координатами (x_1, y_1) попал в сектор обзора антенны. Это значит, что в амплитудном распределении уровней сигнала по направлениям на раскрытие приемной антенны появится максимум ДН вращающейся антенной системы за один оборот $0-360^\circ$. Угловые координаты РТК, азимут и угол места РТК, отсчитываются в тот момент, когда амплитуда принимаемого сигнала на выходе приемника достигнет максимума. При этом нормаль к фазовому фронту приходящей волны оказывается перпендикулярной плоскости раскрытия антенны, а направление максимума ДН совпадает с направлением на источник излучения. В результате происходит обнаружение излучаемого РТК сигнала и регистрация пеленга P_1 на РТК, полученного амплитудным методом (рис. 2). При этом считаем, что от РТК получен первый отсчет.

После движения ДН антенны по описанному выше алгоритму в момент времени t_2 вновь происходит обнаружение сигнала от РТК и определяется пеленг P_2 ; тем самым получен второй отсчет. И так K раз – до тех пор, пока РТК будет находиться в пределах дальности обнаружения $D_{об}$



• Рис. 2. Взаимное положение антенны (в точке O), траектории движения робототехнического комплекса и пеленгов P_1, P_2, P_3 в моменты его обнаружения

• Fig. 2. The mutual position of the antenna (at point O), the trajectory of the robotic complex and the bearings P_1, P_2, P_3 at the time of its detection

вращающейся антенны, в результате чего будет получено K отсчетов.

Необходимо найти курс Q движения РТК и по минимально возможному количеству пеленгов – погрешность σ_Q его определения, а также скорость РТК V и координаты (x_k, y_k) РТК в момент получения k -го отсчета.

Поскольку при определении координат и параметров движения РТК необходимо минимизировать количество пеленгов из-за ограниченного времени нахождения РТК в зоне обзора антенны, то начнем анализ с минимального количества отсчетов.

Получение одиночного отсчета позволяет определить сторону (слева или справа) от положения антенны.

При последовательном получении двух отсчетов от РТК регистрируются моменты времени t_1 и t_2 последовательного определения двух пеленгов P_1 и P_2 , и по ним определяется интервал t_{12} между регистрациями пеленгов:

$$t_{12} = t_2 - t_1,$$

а также величина изменения пеленга (ВИП):

$$P_{12} = P_2 - P_1.$$

По знаку ВИП P_{12} возможно определение направления движения РТК – встречное или уходящее, а также направления перемещения РТК – по часовой или против часовой стрелки относительно положения антенны или прямо в направлении положения антенны.

При последовательном получении трех отсчетов от РТК регистрируются моменты времени определения двух интервалов между регистрациями t_{12} и t_{23} :

$$t_{23} = t_3 - t_2,$$

и ВИП на РТК:

$$P_{23} = P_3 - P_2.$$

Этих данных в момент получения третьего отсчета оказывается достаточно для определения курса движения РТК, а также скорости движения и координат. Для этого специально был разработан метод определения курса РТК по трем пеленгам.

Из $\triangle OAB$ (рис. 2) выразим курс Q РТК через изменение его координат:

$$\operatorname{tg} Q = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}. \quad (1)$$

Поскольку точка A с координатами (x_1, y_1) принадлежит прямой-пеленгу P_1 , а точка B принадлежит, соответственно, прямой-пеленгу P_2 , то представим направление на РТК в формализованном виде:

$$y_1 = k_1 x_1; \quad (2)$$

$$y_2 = k_2 x_2, \quad (3)$$

где k_1, k_2 известны и соответствуют пеленгам P_1 и P_2 .

Расстояние между первым и вторым отсчетами выразим через координаты положения РТК:

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = (Vt_{12})^2. \quad (4)$$

Подставляем (2) и (3) в (4), получаем:

$$x_2^2 - 2x_1 x_2 + x_1^2 + k_2^2 x_2^2 - 2k_1 k_2 x_1 x_2 + k_1^2 x_1^2 = (Vt_{12})^2. \quad (5)$$

Выразим x_1 из (1) и (2) и подставим в (5), получаем:

$$x_2^2 \left(1 - 2 \frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_1 \operatorname{tg} Q} + \left(\frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_1 \operatorname{tg} Q} \right)^2 + k_2^2 - 2k_1 k_2 \frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_1 \operatorname{tg} Q} + k_1^2 \left(\frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_1 \operatorname{tg} Q} \right)^2 \right) = (Vt_{12})^2. \quad (6)$$

Обозначим большую скобку в (6) через A_1 и представим уравнение (6) в виде:

$$A_1 x_2^2 = (Vt_{12})^2. \quad (7)$$

Далее все приведенные рассуждения применим к ΔOBC для точек B и C , получаем:

$$x_2^2 \left(\left(\frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_3 \operatorname{tg} Q} \right)^2 - 2 \frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_3 \operatorname{tg} Q} + 1 + k_3^2 \left(\frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_3 \operatorname{tg} Q} \right)^2 - 2k_2 k_3 \frac{1 - k_2 \operatorname{tg} Q}{1 - k_3 \operatorname{tg} Q} + k_2^2 \right) = (Vt_{23})^2. \quad (8)$$

Обозначим большую скобку в (8) через A_2 , тогда:

$$A_2 x_2^2 = (Vt_{23})^2. \quad (9)$$

Разделим почленно (7) на (9) и приведем обе части полученного уравнения к общему знаменателю, получим трансцендентное уравнение относительно $\operatorname{tg} Q$ вида:

$$\frac{A_1}{A_2} - \left(\frac{t_{12}}{t_{23}} \right)^2 = 0. \quad (10)$$

Для решения (10) воспользуемся численным методом – итерационным методом деления отрезка пополам (методом бисекции) [25, 26].

Обозначим через $F(x)$ левую часть выражения (10), а также $c = \operatorname{tg} Q$, $a = \min(\operatorname{tg} Q)$, $b = \max(\operatorname{tg} Q)$.

На первой итерации задаем нижнюю и верхнюю границы отрезка – диапазоны изменения функции $F(x)$ от $\min(F(x))$ до $\max(F(x))$, на котором расположено искомое значение корня x . Тогда $c \in [a, b]$.

В качестве начального приближения корня принимаем середину этого отрезка: $c_0 = (a + b)/2$. Исследуем значения функции $F(x)$ на концах отрезков $[a, c_0]$ и $[c_0, b]$, т. е. в точках a, c_0, b . Для этого находим произведения $F(a)F(c_0)$ и $F(b)F(c_0)$. Если первое произведение отрицательное, то это означает, что $F(x)$ принимает значения разных знаков, следовательно, содержит искомый корень. Если же второе произведение меньше нуля, то корень принадлежит отрезку $[c_0, b]$. Отрезок, который содержит корень, принимаем в качестве нового отрезка $[a_1, b_1]$, а отрезок, на котором знак $F(x)$ не меняется, отбрасываем. В качестве первого приближения корня принимаем середину нового отрезка $c_1 = (a_1 + b_1)/2$ и т. д. Таким образом, m -е приближение вычисляется как $c_m = (a_m + b_m)/2$.

После каждой итерации отрезок, на котором расположен корень, уменьшается вдвое, а после m итераций он сокращается в 2^m раз:

$$b_m - a_m = (b - a)/2^m.$$

Итерационный процесс необходимо продолжать до тех пор, пока не будет выполнено условие:

$$b_m - a_m < 2\varepsilon,$$

где ε – некоторое заданное малое число, $\varepsilon > 0$.

Преимуществом использования метода деления отрезка пополам является то, что он всегда сходится, при этом полученное решение гарантированно будет иметь любую наперед заданную точность.

При движении РТК курсом, совпадающим с направлением на антенну, все регистрируемые пеленги на РТК одинаковые, ВИП равна нулю, и по этим признакам принимается, что курс РТК совпадает с направлением на точку положения антенны.

Для проведения исследований, направленных на оценку погрешности определения пеленга на РТК, разработана имитационная модель

обнаружения движущегося РТК и вращения ДН антенны, в которой реализован предложенный алгоритм определения курса на РТК по трем пеленгам.

После определения курса Q определяем скорость V движения РТК и координату x_2 , решая совместно систему двух уравнений (7) и (9).

После определения x_2 находим y_2 из (3). Решая совместно (1) и (2), находим координаты x_1 и y_1 .

Аналогично находим (x_3, y_3) .

Таким образом, предложенный метод позволил определить по трем пеленгам параметры движения РТК – курс Q и скорость V , а также его координаты (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) в моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно при получении отсчетов.

В математической имитационной модели изменение координат положения РТК при его равномерном прямолинейном движении опишем разностными уравнениями:

$$\begin{aligned}x_{n+1} - x_n &= V \sin Q \Delta t; \\ y_{n+1} - y_n &= V \cos Q \Delta t,\end{aligned}$$

где n – номер момента времени регистрации пеленга на РТК; $Q = \text{const}$ – курс РТК.

Уравнение прямой, соответствующей оси ДН антенны, опишем:

$$y_a = A_a x_a + B_a,$$

где

$$A_a = \frac{D_{\text{об}} \sin \alpha}{D_{\text{об}} \cos \alpha}, \quad B_a = 0;$$

α – текущий угол положения оси ДН антенны, изменение которого описывается разностным уравнением:

$$\alpha_{n+1} - \alpha_n = \omega \Delta t.$$

Условие обнаружения сигнала и формирования пеленга в зависимости от раствора сектора обзора определяется пересечением оси ДН с траекторией движения РТК. Из геометрических соображений выражение для определения истинного значения пеленга в момент обнаружения РТК имеет вид:

$$P_n = \arctg \left(\frac{X_n - X_{n-1}}{Y_n - Y_{n-1}} \right).$$

Для исключения неоднозначности решения при определении факта обнаружения РТК учитывалось положение направления ДН по квадрантам.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведение численного эксперимента проходило в два этапа.

На первом этапе при различных задаваемых курсах цели определяли расчетный курс по трем первым пеленгам с использованием предложенного в работе метода определения курса РТК.

На втором этапе проводили оценку курса РТК на протяжении всего времени нахождения РТК в секторе обзора – по последним трем пеленгам. При этом был использован фильтр Калмана.

В ходе проведения численного эксперимента первого этапа исследований с использованием разработанной имитационной модели задавали курс движения РТК Q из диапазона $[0^\circ; 75^\circ]$ через 5° . Скорость РТК задавалась постоянной – 50 км/ч.

В каждом такте имитации воспроизводили перемещение лепестка ДН антенны в виде сектора «туда – обратно».

Факт обнаружения РТК регистрировали в момент пересечения траектории движения РТК с осью ДН, в этот момент определяли пеленг.

После регистрации трех пеленгов производили расчет курса перемещения РТК с использованием предложенного в работе метода. Оценка пеленга и определение курса происходило по первому-второму-третьему пеленгам от момента вхождения РТК в зону обзора антенны.

На рис. 3 приведены моделируемый и расчетный курсы РТК по предложенному методу, где по горизонтальной оси отложены варианты моделируемого курса движения РТК, по вертикальной – курсы в градусах.

Из рис. 3 видно, что отклонение по расчетному курсу не превышает 10° относительно задаваемого при моделировании, что свидетельствует о хорошем совпадении результатов, достаточном

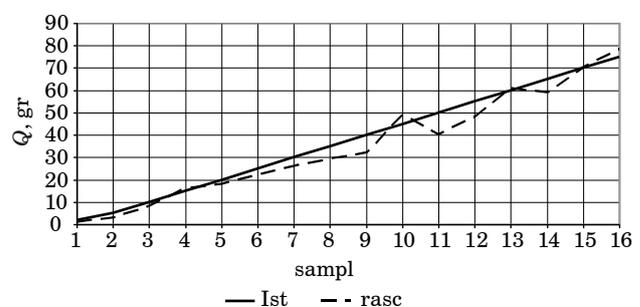


Рис. 3. Изменение моделируемого и расчетного курсов робототехнического комплекса с течением времени

Fig. 3. The simulated and calculated courses according to the proposed method, the courses of movement of the robotic complex

для прогнозирования движения РТК с ошибкой не выше заданной.

Однако на погрешность определения курса влияние оказывает не только погрешность метода, но и погрешность измерения пеленга.

Для этого в моделирование процесса обнаружения и определения пеленга внесена случайность измерений в 30° , равная ширине лепестка ДН.

Для уточнения пеленга по результатам k измерений используем фильтр Калмана [27]:

– примем допущение, что процесс – стационарный, при котором направление движения РТК (курс) не меняется;

– задана модель среднеквадратического отклонения, распределенного по нормальному закону.

Задавалось начальное положение РТК таким образом, чтобы направление движения РТК проходило вблизи антенны (см. рис. 1).

Принималось, что:

– управляющая функция изменения курса имеет вид:

$$u_k = Q_k - Q_{k-1};$$

– известна ошибка модели ξ_k и ее дисперсия σ_{ξ}^k ;

– известна ошибка определения курса средством обнаружения η_k и ее дисперсия σ_{η}^k .

Примем, что уравнение изменения курса имеет вид:

$$x_{k+1} = x_k + u_k + \xi_k,$$

а значение курса по измерениям пеленгов с использованием амплитудного метода:

$$z_k = x_k + \eta_k.$$

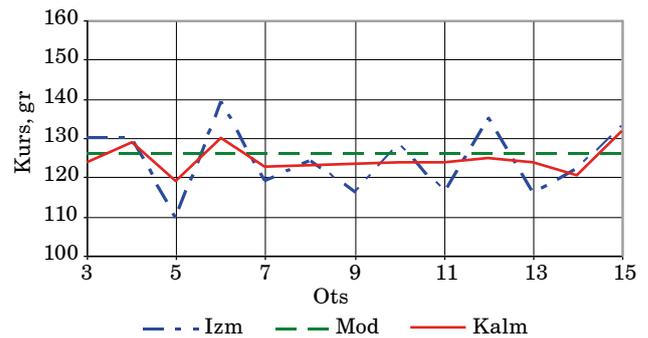
Коэффициент усиления Калмана определяли выражением [27]:

$$K_{k+1} = \frac{(Ee_k^2 + \sigma_{\xi}^2)}{Ee_k^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{\eta}^2}.$$

Для определения среднего значения квадрата ошибки использовали выражение [27]:

$$E(e_{k+1}^2) = \frac{\sigma_{\eta}^2 (Ee_k^2 + \sigma_{\xi}^2)}{Ee_k^2 + \sigma_{\xi}^2 + \sigma_{\eta}^2}.$$

Для оптимально отфильтрованного значения курса [27]:



• Рис. 4. Результаты определения курса с использованием фильтра Калмана

• Fig. 4. Results of determining the course using the Kalman filter

$$x_{k+1}^{\text{opt}} = K_{k+1}z_{k+1} + (1 - K_{k+1})(x_k^{\text{opt}} + u_k).$$

Ошибки ξ_k и η_k разыгрывались по нормальному закону с дисперсиями σ_{ξ} и σ_{η} соответственно.

При проведении численного эксперимента для оценки курса принимали ошибку измерения 30° и ошибку модели 10° . Курс движения РТК при моделировании задавали равным 126° .

Результаты применения фильтра Калмана для уменьшения ошибки определения курса приведены на рис. 4.

На рис. 4 по горизонтальной оси отложены отсчеты получения пеленга, начиная с третьего, при котором возможно было начать определение курса РТК предложенным в работе методом. По вертикальной оси отложено изменение курса с течением времени. Пунктирная линия синего цвета Izm отражает результаты измерений z_k ; пунктирная линия зеленого цвета (Mod) отражает задаваемый при моделировании курс движения РТК; сплошная линия красного Kalm отражает результат применения фильтра Калмана для обработки полученных значений курса.

Из результатов, показанных на рис. 4, видно, что, несмотря на большой разброс значений курса в $(\pm 15)^\circ$, использование фильтра Калмана позволило существенно сократить погрешность определения курса, не превышающую 5° .

Выводы

1. При рассмотрении пеленгации РТК амплитудным методом в целях оперативности определения курса РТК разработан метод определения курса РТК по трем пеленгам. Приведены математические зависимости для определения параметров движения – курса и скорости РТК, а также его координат. Это позволяет прогнозировать

дальнейшее движение РТК для оперативного и эффективного использования средств отведения РТК от охраняемого объекта в целях его безопасности.

2. Для тестирования разработанного метода и получения количественных оценок создана имитационная математическая модель определения курса, скорости и координат РТК. Приведены результаты численных экспериментов, в ходе которых определена погрешность метода.

3. Для уменьшения погрешности разработанного метода и погрешности измерений пеленга при определении курса по трем пеленгам предложено использовать фильтр Калмана. Результаты численного эксперимента показали преимущество использования фильтра Калмана, благода-

ря которому удалось многократно сократить погрешность определения курса.

4. Разработанный метод определения курса по трем пеленгам может быть применен не только при вращении антенны «туда – обратно», но и при круговом вращении антенны в одном и том же направлении, хотя само по себе это более дорогое устройство, связанное с решением проблемы «обматывания» кабеля вокруг штатива, на котором установлена антенна.

5. Предложенное решение позволяет как усилить защиту наземного охраняемого объекта, так и обеспечить безопасность морского автономного необитаемого подводного аппарата дальнего плавания от малоразмерных морских робототехнических комплексов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мартынова Л. А., Розенгауз М. Б. Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гирокоспия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 131–146. Doi: 10.17285/0869-7035.0036.
2. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 204 с.
3. Michel A. H. Counter-drone systems. New York: Center for the Study of the Drone at Bard College, 2019. 45 p.
4. Countering rogue drones. New Delhi: FICCI Committee on Drones, EY, India, 2019. 45 p.
5. Development of UAV tracing and coordinate detection method using a dual-axis rotary platform for an anti-UAV system / B. H. Sheu [et al.] // Applied sciences. 2019. Doi: doi.org/10.3390/app9132583.
6. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar / B. H. Kim, D. Khan, W. Choi, M. Y. Kim // Proceedings Vol. 11005. Laser radar technology and applications. 2 may 2019. Baltimore, Maryland, United States, 2019. Doi: 10.1117/12.2520110.
7. Capture of UAVs through GPS spoofing / J. Gaspar, R. Ferreira, P. Sebastião, N. Souto // 2018 Global Wireless Summit (GWS). IEEE, 2018. P. 21–26. Doi: 10.1109/GWS.2018.8686727.
8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system // Proceedings of the SPIE. 2018. Vol. 10651. Doi: 10.1117/12.2305606.
9. Мартынова Л. А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 31–41. Doi: 10.15217/issn1684-8853.2018.1.31.
10. Мартынова Л. А., Киселев Н. К., Мысливый А. А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Информационно-управляющие системы. 2020. № 4. С. 31–41. Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
11. Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования / В. С. Быкова, Л. А. Мартынова, А. И. Машошин, И. В. Пашкевич // Гирокоспия и навигация. 2020. Т. 28, № 3 (110). С. 109–121. Doi: 10.17285/0869-7035.0041.
12. Безрук Г. Г., Мартынова Л. А., Саенко И. Б. Динамический способ поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Труды СПИИРАН. 2018. № 3 (58). С. 203–226. Doi: 10.15622/sp.58.9.
13. Ефанов В. В., Замота А. А., Гунькина А. С. Методика оценки точности определения параметров движения воздушной цели в условиях скрытного наблюдения за ней на основе применения метода итерации // Труды МАИ. 2021. Вып. 117. С. 1–28. Doi: 10.34759/trd-2021-117-18.
14. Методика обнаружения аэродинамической цели, движущейся по прямолинейной траектории в пространстве / С. А. Житков [и др.] // Труды МАИ. 2019. № 109. С. 1–23. Doi: 10.34759/trd-2019-109-14.
15. Wang R., Deng Y. Bistatic SAR system and signal processing technology. Singapore: Springer, 2018. 286 p.
16. Кирюшкин В. В., Волков Н. С. Межпозиционное отождествление результатов измерений и определение координат воздушных целей в многопозиционной радиолокационной системе на беспилотных летательных аппаратах // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 107–116.

17. Способ управления вооружением летательного аппарата в условиях скрытного наблюдения за целью / В. В. Ефанов, А. А. Закота, А. С. Волкова, А. В. Изосимов // Труды МАИ. 2020. № 112. Doi: 10.34759/trd-2020-112-15. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116555> (дата обращения: 04.11.2022).
18. Закота А. А., Ефанов В. В., Гунькина А. С. Методика оценки точности определения параметров движения воздушной цели в условиях скрытного наблюдения за ней // Труды МАИ. 2020. № 115. Doi: 10.34759/trd-2020-112-15. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111392> (дата обращения: 04.11.2022).
19. Малышкин Г. С., Мельканович В. С. Классические и быстрые проекционные алгоритмы в гидроакустике. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“». 2022. 268 с.
20. Машошин А. И. Алгоритм определения координат подводного акустического источника с использованием корреляционной функции его сигнала // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 6. С. 703–710. Doi: 10.1134/S0320791919060091.
21. Лободин И. Е., Машошин А. И. О возможности обнаружения современных подводных лодок в дальних зонах акустической освещенности // Морская радиоэлектроника. 2019. № 3 (69). С. 56–59.
22. Воронина Н. Г. Решение задачи сопровождения траекторий морских объектов по угломерной информации // Подвод. исслед. и робототехника. 2019. № 3. С. 13–23. Doi: 10.25808/24094609.2019.29.3.002.
23. Малышкин Г. С. Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных алгоритмов // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 6. С. 749–764. Doi: 10.1134/S032079191906008X.
24. Поляк Г. Л. Определение маневра цели по угломерной информации в 2D-задаче слежения при движении наблюдателя прямолинейным курсом // Вестн. ВГУ. Сер.: Физика. Математика. 2019. № 2. С. 125–131.
25. Бахвалов И. С., Жидков Н. Н., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2020. 636 с.
26. Панюкова Т. А. Численные методы. М.: Либроком, 2018. 224 с.
27. Худавердян Д. Фильтр Калмана. URL: <https://habr.com/ru/post/166693/> (дата обращения: 04.11.2022).

REFERENCES

1. Martynova L. A., Rozengauz M. B. Approach to reconfiguration of a motion control system an autonomous underwater vehicle. Gyroscopy and navigation. 2020;11(3):244–253. (In Russ.). Doi: 10.1134/S2075108720030049.
2. Makarenko S. I. Countermeasures against unmanned aerial vehicles: monograph. SPb.: Naukoyemkiye tekhnologii; 2020. 204 p. (In Russ.).
3. Michel A. H. Counter-drone systems. New York: Center for the Study of the Drone at Bard College; 2019. 45 p.
4. Countering rogue drones. New Delhi: FICCI Committee on Drones, EY, India; 2019. 45 p.
5. Sheu B., Chiu C., Lu W. et al. Development of UAV tracing and coordinate detection method using a dual-axis rotary platform for an anti-UAV system. Applied sciences. 2019. Doi: doi.org/10.3390/app9132583.
6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar. Proceedings Vol. 11005. Laser radar technology and applications. 2 may 2019. Baltimore, Maryland, United States; 2019. Doi: 10.1117/12.2520110.
7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P. et al. Capture of UAVs through GPS spoofing. 2018 Global Wireless Summit (GWS). IEEE, 2018, pp. 21–26. Doi: 10.1109/GWS.2018.8686727.
8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system. Proceedings of the SPIE. 2018, vol. 10651. Doi: 10.1117/12.2305606.
9. Martynova L. A. Underwater observation under intellectual interference. Information and control systems. 2018;(1(92)):31–41. (In Russ.). Doi: 10.15217/issn1684-8853.2018.1.31.
10. Martynova L. A., Kiselev N. K., Myslivy A. A. Choice of architecture for a multi-agent control system of an autonomous underwater vehicle. Information and control systems. 2020;(4):31–41. (In Russ.). Doi: 10.31799/1684-8853-2020-4-31-41.
11. Bykova V. S., Martynova L. A., Mashoshin A. I. et al. Dispatcher for a multi-agent control system an autonomous underwater vehicle: structure, algorithms, and simulation results. Gyroscopy and navigation. 2020;11(4):341–349. (In Russ.). Doi: 10.1134/S2075108720040033.
12. Bezruk G. G., Martynova L. A., Saenko I. B. Dynamic method of searching anthropogenic objects in seabed with use of autonomous underwater vehicles. SPIIRAS proceedings. 2018;(3(58)):203–226. (In Russ.). Doi: 10.15622/sp.58.9.
13. Efanov V. V., Zakota A. A., Gunkina A. S. A technique for accuracy evaluation for airborne target movement parameters determining under condition of its covert observation based on iteration method application. Proceedings of the MAI. 2021. Is. 117, pp. 1–28. (In Russ.). Doi: 10.34759/trd-2021-117-18.
14. Zhitkov S. A., Ashurkov I. S., Zakharov I. N. et al. Detecting technique for aerodynamic target moving along rectilinear trajectory in space. Proceedings of the MAI. 2019;(109):1–23. (In Russ.) Doi: 10.34759/trd-2019-109-14.

15. Wang R., Deng Y. Bistatic SAR system and signal processing technology. Singapore: Springer; 2018. 286 p.
16. Kiryushkin V. V., Volkov N. S. Sensor-to-sensor data association and estimation of coordinates of air targets in multisensory radar based on pilotless aircrafts. Theory and technology of radio communication. 2019;(1):107–116. (In Russ.).
17. Efanov V. V., Zakota A. A., Volkova A. S. et al. The aircraft weaponry control technique in conditions of covert target surveillance. Proceedings of the MAI. 2020;(112). (In Russ.). Doi: 10.34759/trd-2020-112-15. Available from: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116555> [Accessed 04 November 2022].
18. Zakota A. A., Efanov V. V., Gunkina A. S. Evaluation technique for motion parameters determining accuracy of aerial target under conditions of covert Surveillance. Proceedings of the MAI. 2020;(115). (In Russ.). Doi: 10.34759/trd-2020-112-15. Available from: <http://trudymai.ru/published.php?ID=111392> [Accessed 04 November 2022].
19. Malyshkin G. S., Melkanovich V. S. Classical and fast projection algorithms in hydroacoustics]. SPb.: St. Petersburg State Scientific Center of the Russian Federation JSC Concern Central Research Institute Elektropribor; 2022. 268 p. (In Russ.).
20. Mashoshin A. I. Algorithm for determining the coordinates of a hydroacoustic source using the correlation function of its signal. Acoustical physics. 2019;65(6):703–710. (In Russ.). Doi: 10.1134/S0320791919060091.
21. Lobodin I. E., Mashoshin A. I. About the modern submarine detection possibility in the ocean convergence zones. Marine radioelectronics. 2019;3(69):56–59. (In Russ.).
22. Voronina N. G. Solving problem of bearings-only marine-target tracking. Underwater research and robotics. 2019;(3):13–23. (In Russ.). Doi: 10.25808/24094609.2019.29.3.002.
23. Malyshkin G. S. Experimental testing of the efficiency of fast projective adaptive algorithms. Acoustical physics. 2019;65(6):749–764. (In Russ.). Doi: 10.1134/S032079191906008X.
24. Polyak G. L. Determination of target maneuver by angular information in 2D tracking problem when the observer moves in a straight course. Vestnik VGU. Series: Physics. Mathematics. 2019;(2):125–131. (In Russ.).
25. Bakhvalov I. S., Zhidkov N. N., Kobelkov G. M. Numerical methods. Moscow: Binom. Knowledge Lab; 2020. 636 p. (In Russ.).
26. Panyukova T. A. Numerical methods. Moscow: Librokom; 2018. 224 p. (In Russ.).
27. Khudaverdyan D. Kalman filter. Available from: <https://habr.com/ru/post/166693/> [Accessed 04 November 2022].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ланцов Константин Вадимович, соискатель, инженер-программист Государственного научно-исследовательского института прикладных проблем.

Область научных интересов – радиолокация, навигационные системы, беспилотные воздушные суда, обработка информации, системный анализ.

Ланцов Валентин Вадимович, соискатель, инженер-программист Государственного научно-исследовательского института прикладных проблем.

Область научных интересов – радиолокация, навигационные системы, беспилотные воздушные суда, обработка информации, системный анализ.

Корякин Александр Викторович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института прикладных проблем.

Область научных интересов – распознавание образов и обработка цифровых сигналов, распознавание трехмерных сцен по разнородной видовой информации, обработка изображений дистанционного зондирования Земли, полученных в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Lantsov Konstantin V., Postgraduate Student, Software Engineer, State Research Institute of Applied Problems.

Research interests – radar, navigation systems, unmanned aerial vehicles, information processing, system analysis.

Lantsov Valentin V., Postgraduate Student, Software Engineer, State Research Institute of Applied Problems.

Research interests – radar, navigation systems, unmanned aerial vehicles, information processing, system analysis.

Koryakin Alexandr V., D. Sc. in Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher, State Research Institute of Applied Problems.

Research interests – pattern recognition and digital signal processing, recognition of three-dimensional scenes by heterogeneous visual information, processing of Earth remote sensing images obtained in different ranges of the electromagnetic spectrum.

Мартынова Любовь Александровна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Концерна «ЦНИИ „Электроприбор“».

Область научных интересов – системный анализ, обработка разнородной информации, математическое и имитационное моделирование.

Поступила в редакцию 13.03.2023

Поступила после рецензирования 28.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Martynova Lyubov A., D. Sc. in Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC.

Research interests – system analysis, processing of heterogeneous information, mathematical and simulation modeling.

Received 13.03.2023

Revised 28.03.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья
УДК 004.8

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-41-50

Технология построения в Hugin Lite наивного байесовского классификатора на основе исходного набора данных

Марсель Равильевич Вагизов¹

✉ bars-tatarin@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4848-1619

Сергей Петрович Хабаров¹

serg.habarov@mail.ru, orcid.org/0000-0003-1337-0150

Артём Павлович Потапов¹

sarqant@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. На базе простейшего набора данных рассматривается реализованная в Hugin Lite технология построения наивного байесовского классификатора. Дано подробное описание последовательности шагов по построению структуры байесовской сети на базе исходного набора данных, ее обучения и использования для прогноза. Рассмотрены разные подходы к настройке сети в случае, когда переменные в исходной выборке являются дискретными (символьными, числовыми, интервальными) или непрерывными. Показана возможность оценки качества настройки сети при использовании интервальных переменных. Для построения классификатора были использованы реализованные в Hugin Lite алгоритм NPC (Necessary Path Condition) для построения структуры и алгоритм EM (Expectation Maximization) для обучения сети.

Ключевые слова: искусственный интеллект, байесовские сети, классификация, прогноз, экспертные системы

Для цитирования: Вагизов М. Р., Хабаров С. П., Потапов А. П. Технология построения в Hugin Lite наивного байесовского классификатора на основе исходного набора данных // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 41–50. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-41-50.

Original article

Technology for building a naive Bayes classifier in Hugin Lite based on the original dataset

Marsel R. Vagizov¹

✉ bars-tatarin@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-4848-1619

Sergey P. Khabarov¹

serg.habarov@mail.ru, orcid.org/0000-0003-1337-0150

Artem P. Potapov¹

sarqant@gmail.com

¹ Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Based on the simplest dataset, the article discusses the technology of building a naive Bayes classifier implemented in Hugin Lite. A detailed description of the sequence of steps for building a Bayesian network structure based on the initial dataset, its training and use for forecasting is given. Different approaches to setting up the network are considered in the case when the variables in the initial sample are discrete (symbolic, numeric, interval) or continuous. The possibility of assessing the quality of network tuning using interval variables is shown. To build the classifier, the following implemented in Hugin Lite were used: the NPC (Necessary Path Condition) algorithm to build the structure and the EM (Expectation Maximization) algorithm to train the network.

Keywords: artificial intelligence, Bayesian networks, classification, forecast, expert systems

For citation: Vagizov M. R., Khabarov S. P., Potapov A. P. Technology for building a naive Bayes classifier in Hugin Lite based on the original dataset. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):41–50. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-41-50.

Введение

Понятие байесовских сетей (БС) введено Джуди Перлом еще в 1988 г., когда он предложил подход к построению вероятностных моделей

с использованием ориентированных графов без циклов [1]. Эти модели стали одним из современных подходов в искусственном интеллекте, а сам Перл в 2011 г. стал лауреатом Премии Тьюринга за «фундаментальный вклад в искусственный

интеллект посредством разработки исчисления для проведения вероятностных и причинно-следственных рассуждений».

Широкому распространению инструментария БС способствовало то, что он позволяет естественным образом совмещать в себе закономерности, выводимые из данных, с экспертными знаниями, которые задаются в явном виде. Наиболее простым вариантом использования БС является наивно-байесовский подход (Naive Bayes), который является достаточно прозрачным и понятным методом классификации. Он базируется на том, что все переменные являются одинаково важными и все они статистически независимы [2].

В настоящее время на рынке присутствуют программные продукты, которые имеют развитый графический интерфейс по формированию БС, их настройке, обучению и исследованию – это BayesServer, Netica, BayesFusion, AgenaRisk и ряд других. К их числу относится и Hugin Expert, у которого есть бесплатная пробная версия Hugin Lite. Она обладает полным функционалом для работы с сетями, у которых число вершин должно быть не более 50 и с общим числом состояний до 500 [3].

Реализованный в Hugin Lite наивно-байесовский подход позволяет строить сети, которые достаточно просто интерпретируются и, что самое главное, позволяют на этапе прогностического моделирования легко проводить анализ по сценарию «что, если». Идея наивно-байесовского метода заключается в расчете условной вероятности принадлежности объекта к классу при равенстве его независимых переменных определенным зна-

чениям. Из этих предпосылок следует, что Hugin Lite позволяет непосредственно в своей графической среде строить наивные байесовские классификаторы и использовать их для прогноза.

Однако как в технической документации на систему, так и в литературных источниках на сегодняшний день отсутствует достаточно подробное описание технологии решения данной задачи в среде Hugin Lite. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть четкой последовательности шагов, которые необходимо выполнить для решения данной задачи с подробным описанием выполняемых для этого действий в графической среде Hugin Lite.

Постановка задачи

Для исследования одной из возможных технологий построения наивных байесовских классификаторов в среде Hugin Lite предполагается использовать простейший набор данных, который применяется во многих литературных и интернет-источниках и для которого известны аналитические решения [4, 5]. Этот набор данных описывает возможность проведения спортивной игры в зависимости от климатических факторов (таблица).

В этом наборе данных свидетельства являются символьными элементами конечного множества, т. е. имеют категориальный тип. Кроме этого, из литературы известен и байесовский прогноз на основе этой модели для свидетельств («Солнце», «Холодно», «Высокая», «Есть»). Он состоит в том,

- *Исходный набор данных*
- *Initial dataset*

Номер	Наблюдение	Температура	Влажность	Ветер	Игра
1	Солнце	Жарко	Высокая	Нет	Нет
2	Солнце	Жарко	Высокая	Есть	Нет
3	Облачность	Жарко	Высокая	Нет	Да
4	Дождь	Норма	Высокая	Нет	Да
5	Дождь	Холодно	Норма	Нет	Да
6	Дождь	Холодно	Норма	Есть	Нет
7	Облачность	Холодно	Норма	Есть	Да
8	Солнце	Норма	Высокая	Нет	Нет
9	Солнце	Холодно	Норма	Нет	Да
10	Дождь	Норма	Норма	Нет	Да
11	Солнце	Норма	Норма	Есть	Да
12	Облачность	Норма	Высокая	Есть	Да
13	Облачность	Жарко	Норма	Нет	Да
14	Дождь	Норма	Высокая	Есть	Нет

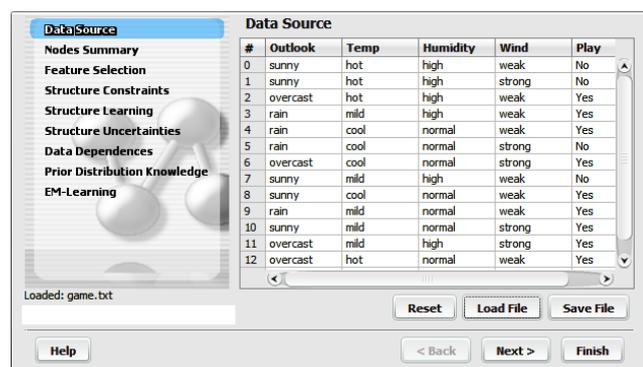
что вероятность проведения игры будет 0,205, и 0,795 в ином случае.

Для решения этой задачи в среде Hugin Lite потребуется загрузить исходный набор данных, определить структуру байесовской сети, выполнить ее инициализацию, провести обучение и получить прогноз.

Определение структуры байесовской сети

Для начала построения наивного байесовского классификатора необходимо запустить Hugin Lite, в основном меню активировать режим **Wizards** и выбрать опцию **Learning Wizard**. Откроется окно **Data Source**, где следует нажать кнопку **Load File** и загрузить файл с исходным набором данных (рис. 1).

При нахождении в данном окне имеется возможность проводить избирательный анализ исходного набора данных. Например, выяснить влияния возможных исходов конкретного сви-



- Рис. 1. Загрузка исходного набора данных
- Fig. 1. Loading the initial dataset

#	Outlook	Temp	Humidity	Wind	Play
0	sunny	hot	high	weak	No
1	sunny	hot	high	strong	No
2	overcast	hot	high	weak	Yes
3	rain	mild	high	weak	Yes
4	rain	cool	normal	weak	Yes
5	rain	cool	normal	strong	No
6	overcast	cool	normal	strong	Yes
7	sunny	mild	high	weak	No
8	sunny	cool	normal	weak	Yes
9	rain	mild	normal	weak	Yes
10	sunny	mild	normal	strong	Yes
11	overcast	mild	high	strong	Yes
12	overcast	hot	normal	weak	Yes
13	rain	mild	high	strong	No

- Рис. 2. Анализ взаимовлияния параметров
- Fig. 2. Analysis of the mutual influence of parameters

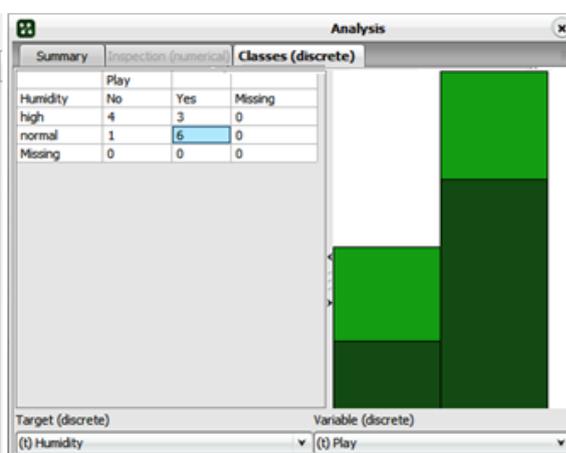
детельства на каждый из исходов целевой переменной. В частности, на рис. 2 показан пример исследования влияния показателя влажности на возможность проведения игры.

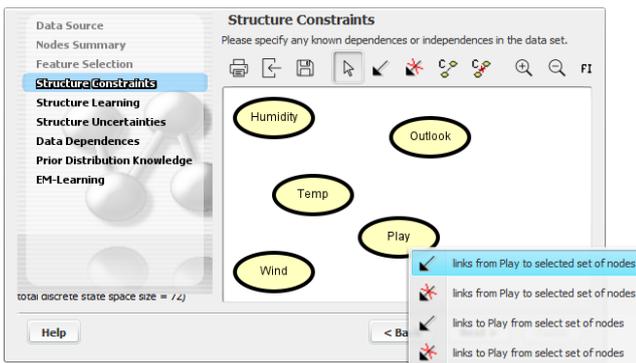
Однако в рамках поставленной нами задачи и ограниченного по объему исходного набора данных опция **Analysis** не является особо актуальной и может быть пропущена. Поэтому, находясь в окне **Data Source**, можно нажать кнопку **Next** и в окне **Nodes Summary** убедиться в том, что все вершины сети имеют категориальный символьный тип (**Labelled**).

Нажатием кнопки **Next** будет выполнен переход в режим **Feature Selection**, который позволяет осуществить выбор функции, которая может сузить набор узлов сети. Для рассматриваемого набора данных это является недоступным, и поэтому, пропустив этот режим, следует перейти к режиму **Structure Constraints**.

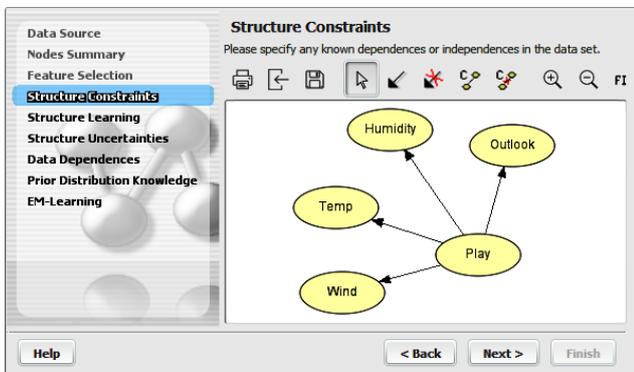
В этом режиме Hugin Lite представляет все узлы сети, предполагаемые к включению в БС и автоматически определенные системой на основе анализа исходного набора данных (рис. 3). В диалоговом окне этого режима Hugin Lite предлагает в виде ограничений указать любые известные зависимости или их отсутствие, которые реально существуют в исходном наборе данных.

Дело в том, что на следующих этапах определения структуры БС система Hugin Lite предложит автоматически настроить сеть с использованием одного из восьми возможных алгоритмов статистического анализа набора данных. Это совсем не значит, что система найдет все те связи, которые на экспертном уровне присутствуют в наборе данных. Поэтому на этом этапе целесообразно в виде ограничений указать все те связи, необходимость присутствия которых в структуре БС признается экспертом (рис. 4).





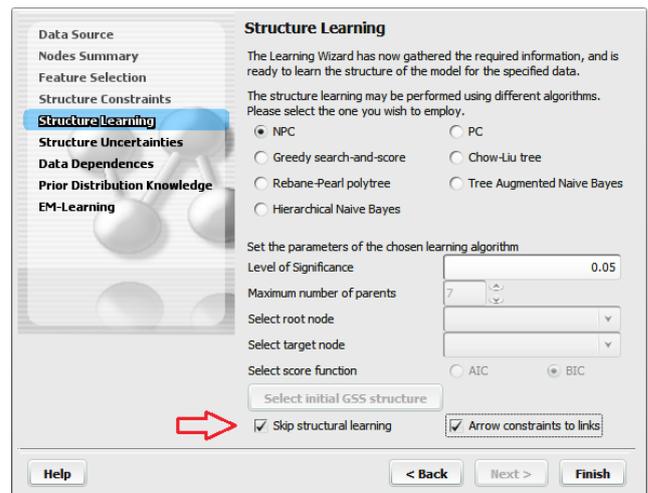
- Рис. 3. Состав узлов БС на основе анализа системой набора данных
- Fig. 3. Composition of BN nodes based on the analysis of the dataset system



- Рис. 4. Ограничения, указанные экспертом при формировании БС
- Fig. 4. Limitations indicated by the expert in the formation of the BN

Для рассматриваемого набора данных на экспертном уровне абсолютно очевидна причинно-следственная связь между игрой и погодными условиями, что позволяет в качестве исходных ограничений указать необходимость присутствия в проектируемой БС связей между целевой вершиной и всеми остальными. Для этого следует в окне **Structure Constraints** выделить все вершины, щелкнуть правой кнопкой мышки по целевой вершине (**Play**). Появится всплывающее меню, в котором надо выбрать режим установления связей целевой вершины со всеми выделенными. На этом задание ограничений можно завершить, и нажатием кнопки **Next** выполнить переход к следующему режиму – режиму структурного обучения (рис. 5).

Ввиду того, что основной задачей является построение байесовского классификатора, который должен прогнозировать возможность проведения игр в зависимости от погодных условий, то можно считать излишним тщательный анализ взаимосвязей между всеми параметрами, присут-



- Рис. 5. Выход из режима Structure Learning
- Fig. 5. Exiting the Structure Learning mode

ствующими в исходном наборе данных. Так, например, для решения нашей задачи малозначима связь между температурой и влажностью, а связь между температурой и игрой уже учтена в ограничениях. Поэтому, считая структуру сети уже определенной, данный шаг можно пропустить нажатием кнопки **Finish**.

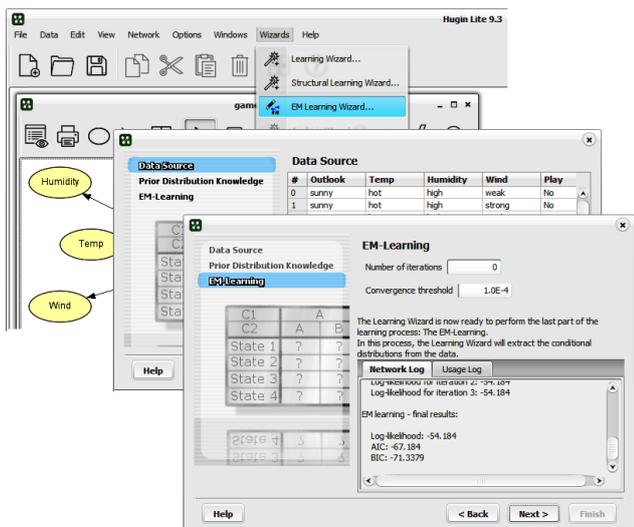
Инициализация и обучение байесовской сети

Выйдя из режима **Learning Wizard**, система автоматически перейдет в режим редактирования БС. Следует отметить, что на текущий момент определена только структура БС – состав узлов и связи между ними. Для целей ее обучения на исходном наборе данных необходима начальная инициализация – создание для каждого из узлов сети таблиц априорных и условных вероятностей.

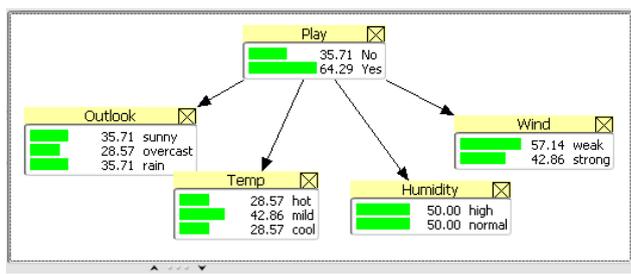
Самый простой путь – это выделить на модели все узлы, правой кнопкой мышки вызвать всплывающее меню и выбрать опцию **Experience/Fading Table Operations > Add Experience Table to selected Chance Nodes**. После чего можно перейти к обучению сети, выбрав в главном меню команду **Wizards** и опцию **EM-Learning Wizard** (рис. 6).

На первом шаге надо снова загрузить тот же набор данных, второй шаг можно пропустить, так как априорные распределения были уже заданы на шаге инициализации БС, а на третьем – надо задать точность работы EM-алгоритма [6]. По окончании его работы обученная сеть сама откроется в окне режима редактирования (рис. 7).

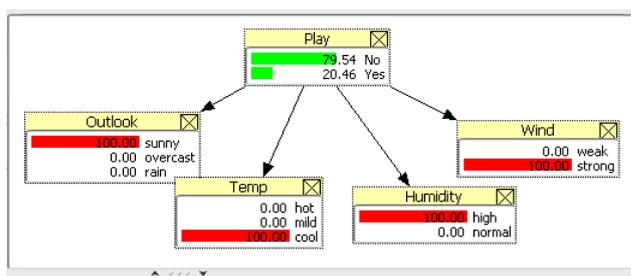
На рис. 7 вместе со структурой сети показаны таблицы априорных и условных вероятностей для



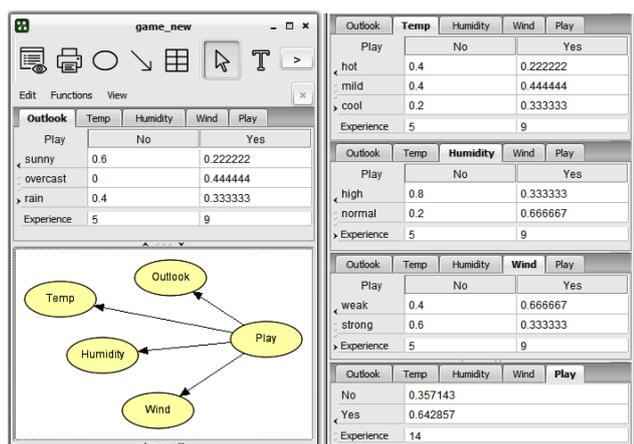
• Рис. 6. Режим обучения сети на исходном наборе данных
 • Fig. 6. Network training mode on the initial dataset



• Рис. 8. Исходное состояние обученной сети в режиме работы
 • Fig. 8. Initial state of the trained network in run mode



• Рис. 9. Прогноз проведения игр при конкретных погодных условиях
 • Fig. 9. Forecast of the games under specific weather conditions



• Рис. 7. Обученная сеть и вид таблиц для всех ее узлов
 • Fig. 7. The trained network and the view of the tables for all its nodes

всех узлов сети, которые получились в результате обучения сети на исходном наборе данных. Надо отметить, что все полученные значения с высокой точностью совпадают с рассчитанными аналитически [4, 5]. Это позволяет сделать вывод, что обученную БС можно рассматривать как наивный байесовский классификатор с возможностью его использования для целей прогноза.

Если перевести сеть в режим работы, упорядочить размещение ее вершин (**Network > Layout the nodes**) и отобразить их графически (**Toggle monitor windows**), то вид исходного состояния обученной БС будет аналогичен показанному на рис. 8.

Для получения прогноза о проведении игр при конкретных погодных условиях – «Солнце»,

«Холодно», «Высокая», «Есть» – эти свидетельства следует ввести в сеть. Для этого достаточно щелкнуть мышкой по соответствующим исходам, и сеть представит распределение вероятностей для узла **Play** (рис. 7), которое полностью соответствует аналитически рассчитанному [4, 5].

Задачу построения классификатора на основе набора данных, состоящего из символьных данных категориального типа, можно считать решенной. С его помощью можно выполнять прогностическое моделирование. Но при этом надо иметь в виду, что для такого типа наборов данных в Hugin Lite отсутствуют какие-либо методы оценки качества построенной сети. Но если такая оценка необходима, то можно рекомендовать несколько иную технологию обучения сети, которая основана на приведении исходного набора данных к набору данных с интервальными переменными категориального типа.

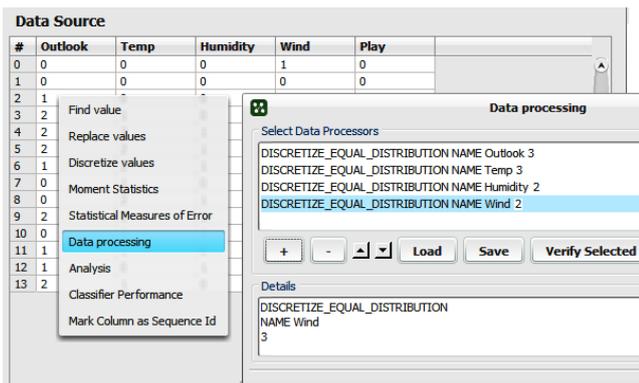
Байесовская сеть с интервальными переменными

Для решения вновь поставленной задачи преобразуем исходный файл с символьными данными в файл с числовыми данными, заменив в исходном файле символьные значения на их

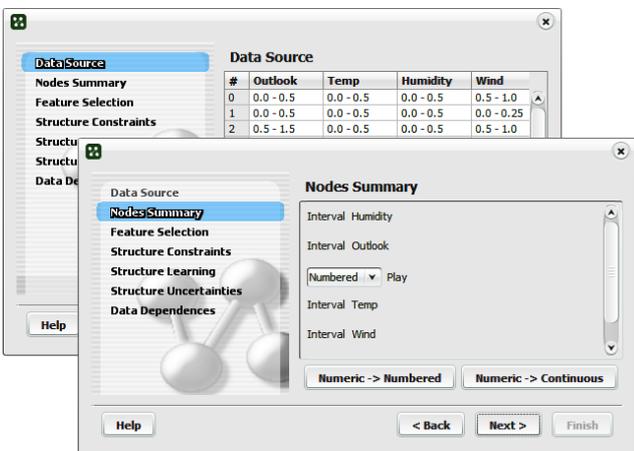
числовые коды. Так, например, возможными исходами события «Наблюдение» теперь будут 1 – «Солнце», 2 – «Облачность» и 3 – «Дождь». Это позволит в **Learning Wizard** выполнить дискретизацию вновь сформированного набора данных и осуществить переход к интервальным переменным (рис. 10).

Для этого в режиме **Data Source** после загрузки нового набора данных надо щелкнуть правой кнопкой мышки и перейти в режим обработки данных (**Data Processing**), где следует создать препроцессоры дискретизации данных для всех переменных, кроме целевой. В среде Hugin Lite реализовано несколько разных подходов к дискретизации переменных – ручная, равномерно распределенная и с выбором числа интервалов, минимизирующих энтропию в другом дискретном целевом столбце.

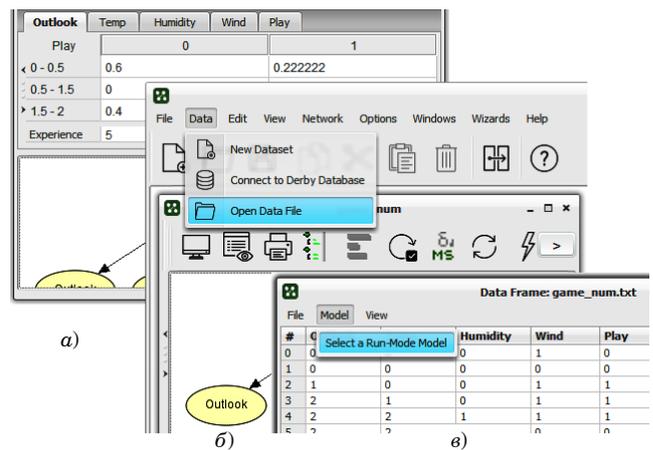
Дискретизация – это задача разделения набора числовых значений на ряд интервалов. В примере (рис. 10) использованы препроцессоры для



• Рис. 10. Дискретизация исходного набора данных
 • Fig. 10. Discretization of the original dataset



• Рис. 11. Набор данных с интервальными типами данных
 • Fig. 11. Dataset with interval data types



• Рис. 12. Начало тестирования качества обучения сети: а – исходная модель; б – модель в режиме работы; в – загрузка в модель тестового набора данных
 • Fig. 12. Beginning of testing the quality of network training: а – the initial model; б – the model in operation mode; в – loading a test dataset into the model

равномерно распределенной дискретизации, параметром которых является количество целевых интервалов. После запуска их в работу в окне **Data Source** отобразится преобразованный набор данных (рис. 11).

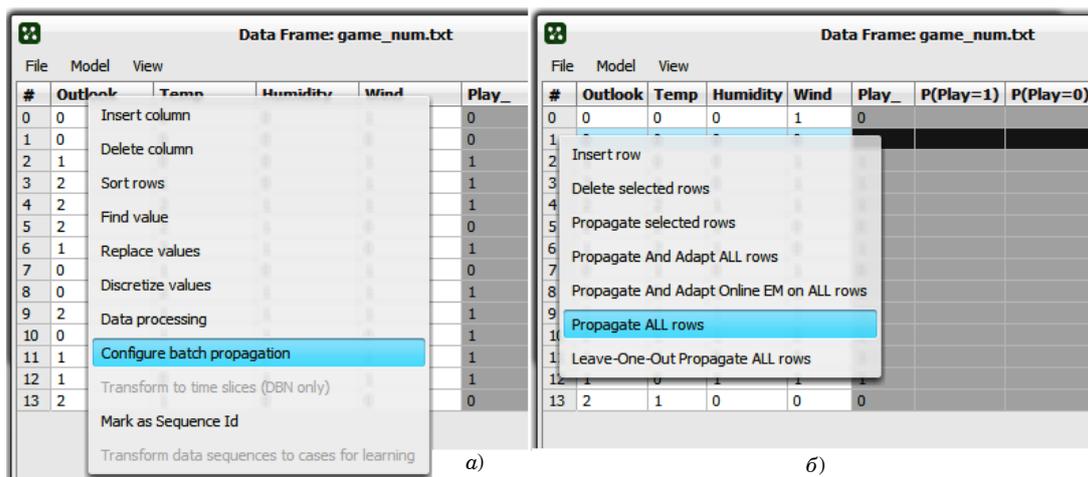
Выполнив переход на следующий шаг мастера обучения (**Nodes Summary**), можно убедиться, что используемый для обучения БС набор данных имеет четыре узла с интервальными переменными и один – с числовыми.

Дальнейшие шаги по обучению сети полностью соответствуют описанной выше технологии. В результате чего будет получена сеть, структура и параметры которой полностью аналогичны показанным на рис. 7. Отличие состоит только в типах данных для описания каждой из переменных (рис. 12, а).

Но именно это и позволяет оценить качество обучения сети, которая была получена на преобразованном наборе данных.

Оценка качества обучения сети с интервальными переменными

С этой целью попробуем выяснить, как сеть с интервальными переменными будет работать на исходном числовом наборе данных. Для этого, прежде всего, надо перевести модель сети в режим работы, а затем подгрузить исходный файл с числовыми данными, нажав **Data > Open Data File** (рис. 12, б). После того, как тестовый файл будет открыт в новом диалоговом окне, его следует связать с работающей моделью, нажав **Model > Select a Run-Mode Model**



• Рис. 13. Начало тестирования качества обучения сети: а – выбор целевой переменной; б – выбор исходов из тестового набора данных
 • Fig. 13. Starting to test the quality of network training: а – selection of the target variable; б – selection of outcomes from the test dataset

(рис. 12, в). Находясь в окне **Data Frame**, можно выяснить, как хорошо обученная сеть предсказывает состояние **Play** на тестовом наборе данных. Для этого следует:

1) переименовать переменную **Play**. Например, в **Play_** – этот столбец темнеет, показывая, что он исключен из пакетного распространения;

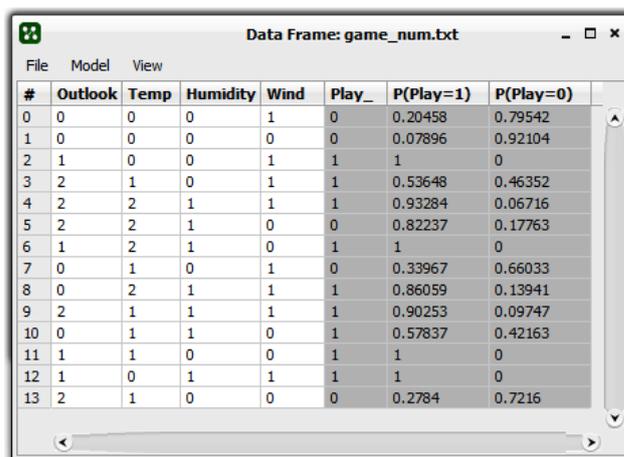
2) щелкнув по заголовку таблицы, выбрать **Configure batch propagation** и указать целевую переменную и те исходы, для которых должны выполняться пакетные распространения. В таблице для каждого из них автоматически сформируются новые столбцы (рис. 13, а).

Щелчок по номеру строки обеспечит распространение вероятностей для этой строки. Для пакетного распространения вероятностей на все строки набора данных следует правой кнопкой мышки вызвать всплывающее меню и выбрать опцию **Propagate All rows** (рис. 13, б).

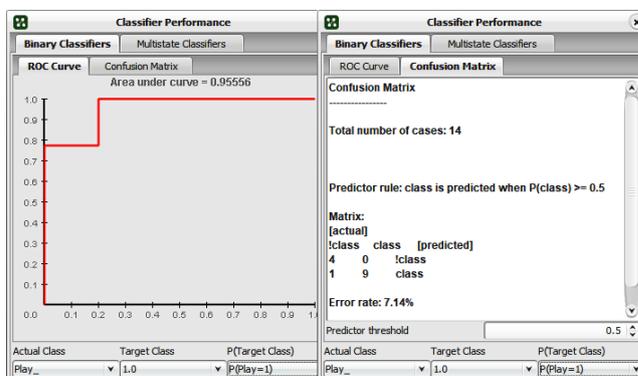
Имея эти результаты (рис. 14), можно выполнить сравнение конкретных наблюдений о проведении игр (**Play_**) с оценкой вероятности их проведения при известных погодных условиях, предсказанных обученной байесовской сетью $P(\text{Play}=1)$. Для рассматриваемого короткого набора данных это можно выполнить и визуально, но удобнее использовать встроенные в Hugin Lite средства статистического анализа. Например, бинарный классификатор.

Для этого следует правой кнопкой мышки вызвать всплывающее меню и выбрать опцию **Classifier Performance**. Затем в окне бинарного классификатора заполнить выпадающие списки. В частности, выбрать целевое событие (**Play_**). Указать интересующий нас исход этого события (1,0), а также переменную, соответствующую

предсказанной сетью вероятности появления этого события.



• Рис. 14. Результат пакетного распространения вероятностей
 • Fig. 14. The result of probability batch propagation



• Рис. 15. Результат бинарной классификации
 • Fig. 15. The result of binary classification

Результат бинарной классификации – это значения кривой и матрицы ошибок [7], которые позволяют сделать вывод о достаточно хорошем качестве обучения байесовской сети на преобразованном наборе данных (рис. 15).

Следует отметить, что реализованная в Hugin Lite и подробно описанная выше технология обучения БС на наборах данных категориального типа может быть успешно применена и для наборов данных с непрерывными переменными.

Байесовская сеть с непрерывными переменными

В качестве примера демонстрации описанной выше методики для случая непрерывных переменных рассмотрим известный в машинном обучении набор данных ирисов Фишера [8]. Этот набор данных включает в себя три класса по 50 экземпляров в каждом, где каждый класс относится к конкретному типу ириса.

В качестве атрибутов используются: **petal_length** (длина чашелистика, см), **petal_width** (ширина чашелистика, см), **sepal_length** (длина лепестка, см) или **sepal_width** (ширина лепестка, см).

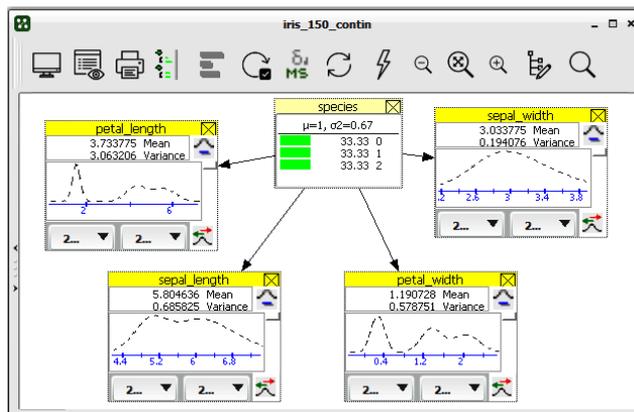
Прогнозируемым признаком является класс ирисовых растений (**species**): **Iris Setosa** (код 0), **Iris Versicolour** (код 1) или **Iris Virginica** (код 2).

Если исходный набор данных загрузить в среду Hugin Lite, провести его статистический анализ, определить состав узлов БС, указать ограничения на возможные причинно-следственные связи и выполнить обучение сети, то после запуска такой сети в работу она будет иметь вид, показанный на рис. 16.

Особенность этой БС состоит в том, что она может выполнять логические выводы как от гипотез к следствиям, так и от следствий к гипотезам. При этом, как видно из рис. 17, эта сеть является еще и достаточно хорошо обученной.

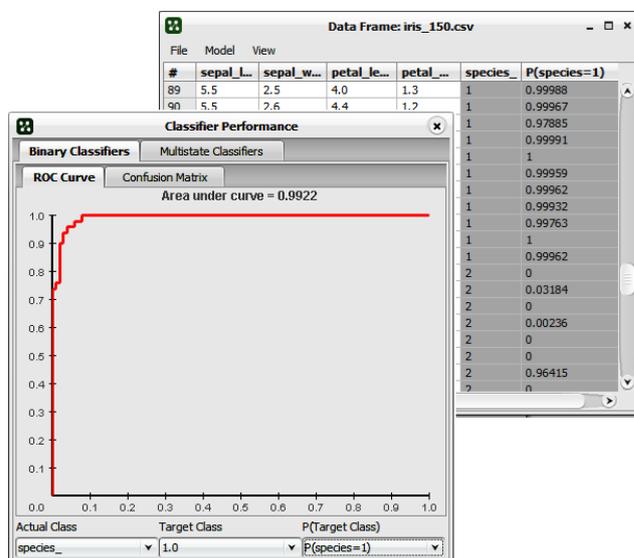
Заключение

Проведенные исследования позволили на базе простейших наборов данных исследовать реализованную в среде Hugin Lite технологию построения наивных байесовских классификаторов. Это позволило сформулировать подробное описание последовательности шагов по построению струк-



• Рис. 16. Наивный байесовский классификатор ирисов Фишера

• Fig. 16. Fisher's naive Bayesian iris classifier



• Рис. 17. Оценка качества обучения классификатора ирисов Фишера

• Fig. 17. Evaluation of the quality of training of the Fisher iris classifier

туры байесовской сети на базе исходного набора данных, ее обучению и использованию для целей прогноза.

Рассмотрены различные подходы к настройке сети в случае, когда переменные в исходной выборке являются дискретными (символьными, числовыми, интервальными) или непрерывными. Показана возможность оценки качества настройки сети при использовании интервальных переменных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Pearl J.* Probabilistic reasoning in intelligent systems. CA: Morgan Kaufmann, 1988.
2. *Сукар Л. Э.* Вероятностные графовые модели: принципы и приложения / пер. с англ. А. В. Снастина. М.: ДМК Пресс, 2021. 338 с.
3. HUGIN Lite. URL: <https://www.hugin.com/hugin-lite/> (дата обращения: 20.01.2023).
4. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.: ил.
5. Классификация. Гипотезы компактности и непрерывности – презентация онлайн. URL: <https://ppt-online.org/336081> (дата обращения: 26.01.2023).
6. EM-алгоритм // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/EM-алгоритм> (дата обращения: 26.01.2023).
7. Receiver operating characteristic. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Receiver_operating_characteristic (дата обращения: 26.01.2023).
8. UCI machine learning repository: Iris dataset. URL: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Iris> (дата обращения: 26.01.2023).

REFERENCES

1. Pearl J. Probabilistic reasoning in intelligent systems. CA: Morgan Kaufmann; 1988.
2. Sucar L. E. Probabilistic graph models: principles and applications. Moscow: DMK Press; 2021. 338 p. (In Russ.).
3. HUGIN Lite. Available from: <https://www.hugin.com/hugin-lite/> [Accessed 20 January 2023].
4. Barsegyan A. A., Kupriyanov M. S., Stepanenko V. V., Kholod I. I. Methods and models of data analysis: OLAP and Data Mining. SPb.: BXV-Peterburg; 2004. 336 p. (In Russ.).
5. Classification. Hypotheses of compactness and continuity – an online presentation. Available from: <https://ppt-online.org/336081> [Accessed 26 January 2023].
6. EM-algorithm. Wikipedia. Available from: <https://ru.wikipedia.org/wiki/EM-algorithm> [Accessed 26 January 2023].
7. Receiver operating characteristic. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Receiver_operating_characteristic [Accessed 26 January 2023].
8. UCI machine learning repository: Iris dataset. Available from: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Iris> [Accessed 26 January 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вагизов Марсель Равильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова.

Область научных интересов – технологии обработки информации, методы искусственного интеллекта, машинное обучение, геоинформатика.

Хабаров Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова.

Область научных интересов – технологии обработки информации, методы искусственного интеллекта, инфокоммуникационные системы.

Потапов Артём Павлович, магистр кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С. М. Кирова.

Vagizov Marsel R., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Information Systems and Technologies, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov.

Research interests – information processing technologies, methods of artificial intelligence, machine learning, geoinformatics.

Khabarov Sergey P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Systems and Technologies, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov.

Research interests – information processing technologies, methods of artificial intelligence, information and communication systems.

Potapov Artem P., Master Student at the Department of Information Systems and Technologies, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov.

Область научных интересов – технологии обработки информации, методы искусственного интеллекта, машинное обучение, геоинформатика.

Поступила в редакцию 13.04.2023

Поступила после рецензирования 20.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Research interests – information processing technologies, methods of artificial intelligence, machine learning, geoinformatics.

Received 13.04.2023

Revised 20.04.2023

Accepted 28.04.2023

Исследование температурных режимов филаментизации PLA-пластика при прототипировании

Станислав Анатольевич Назаревич¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

Анастасия Вячеславовна Свириденко¹

an.sviridenko29@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2979-5235

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается степень влияния температурного режима на процесс прототипирования с использованием PLA-пластика, в частности, на появление дефектов в напечатанном изделии.

Ключевые слова: аддитивное производство, филаментизация PLA-пластика, 3D-технологии, FFF-устройства, инфракрасная термография

Для цитирования: Назаревич С. А., Свириденко А. В. Исследование температурных режимов филаментизации PLA-пластика при прототипировании // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 51–55. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-51-55.

Original article

Research of temperature regimes of filamentation of PLA plastic during prototyping

Stanislav A. Nazarevich¹

✉ albus87@inbox.ru, orcid.org/0000-0002-0665-8036

Anastasiya V. Sviridenko¹

an.sviridenko29@gmail.com, orcid.org/0009-0005-2979-5235

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article examines the degree of influence of the temperature regime on the prototyping process using PLA plastic, in particular, on the appearance of defects in the printed product.

Keywords: additive manufacturing, filamentation of PLA plastic, 3D technologies, FFF-devices, infrared thermography

For citation: Nazarevich S. A., Sviridenko A. V. Research of temperature regimes of filamentation of PLA plastic during prototyping. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):51–55. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-51-55.

Введение

Являясь полной противоположностью субтрактивных методов производства изделий, аддитивное производство стало одним из мировых трендов четвертой промышленной революции. На данный момент происходит формирование отдельной перспективной отрасли аддитивных технологий, что способствует появлению новых модифицированных установок повышенной точности отечественного производства. Тем не менее, несмотря на повышающуюся распространенность трехмерной печати в промышленности, остается ряд нерешенных научно-технических проблем, к которым, кроме прочих, относится проблема обеспечения прочности, точности формы и качества поверхности производимых изделий.

Материал и методы исследования

Существует ряд распространенных дефектов 3D-печати:

- нарушение экструдирования пластика в начале печати;
- низкая степень адгезии, лишняя или недостаточная экструзия пластика;
- возникновение отверстий и разрывов в верхних слоях детали;
- наплавление остаточных материалов при ретракте;
- перегрев пластика, расцентровка или смещение слоя печати;
- расслоение, притирка волокна;
- непоследовательная экструзия пластика;
- внутренние разрывы модели;

- образование закрученных и шероховатых углов;
- волнистость на поверхности изделия, отверстия и пробелы в нижних углах изделия, линии на боковых сторонах изделия;
- царапины на верхней поверхности изделия;
- непропечатанность малых частей изделия; засор сопел экструдера [1].

Кроме того, печать на FFF-устройствах, в частности, с использованием аддитивной установки Designer PRO 250 от PICASO, сопровождается чередованием температурных сред: материал расплавляется в горячем экструдере и подается на разогретый стол, следуя через холодную среду – окружающий воздух. По причине чередования горячего и холодного окружений в изделии возникает остаточное напряжение, которое приводит к появлению дефектов напечатанной детали или же, при отсутствии таковых, становится причиной повышенного износа детали при эксплуатации [2].

Проведение статистического анализа данных о дефектах и причинах их возникновения показало, что двумя основными причинами появления дефектов при прототипировании являются несоответствие температурных режимов и человеческий фактор, связанный с обслуживанием оборудования [3]. Рассмотрим влияние температурного режима на появление дефектов в полимерном изделии.

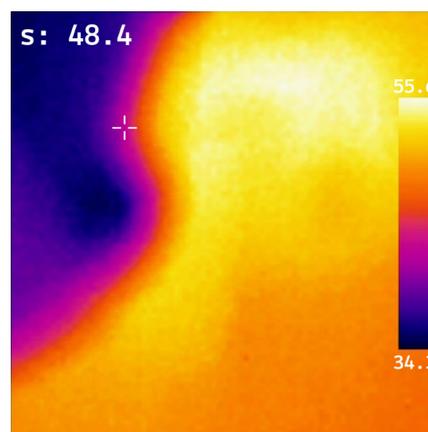
PLA-пластик является одним из самых популярных и распространенных материалов для создания изделий посредством послойного синтеза: его температура филаментизации лежит в диапазоне от 180 до 230 °С, что задает температуру нагрева экструдера. Температура стола при выполнении FFF-печати с использованием PLA должна быть в пределах 20–60 °С.

Температура нагрева стола – важный фактор для обеспечения достаточной адгезии материала. При выполнении печати его фактическая температура отличается от заданной программой в зависимости от наносимого слоя и близости экструдера (табл. 1). Значение фактической температуры стола на границе с филаментом было зафиксировано с применением метода инфракрасной термографии (рис. 1). По графику изменения температуры стола 3D-принтера в процессе печати (рис. 2) регистрируется резкое повышение температуры рабочей поверхности на 4–10-й минутах печати, что соответствует нанесению первых слоев изделия. Дополнительный нагрев стола вызван близостью горячего экструдера к поверхности стола. По мере нанесения следующих слоев и удаления экструдера от рабочей поверхности стол равномерно остывает до заданной программой температуры – 20 °С.

Для филаментизации PLA-пластика необходимо установить оптимальную температуру экс-

- *Таблица 1. Изменение температуры стола 3D-принтера в процессе печати*
- *Table 1. Changing the temperature of the 3D printer table during printing*

Этап печати	Значение фактической температуры, °С	Заданное значение температуры, °С
Перед печатью	20	20
1 % выполнения программы при закрытой крышке принтера	56	20
1 % выполнения программы при открытой крышке принтера	46	20
1 % выполнения программы при открытой крышке принтера на границе с филаментом	48,4	20
10 % выполнения программы	28	20
50 % выполнения программы	20	20



- *Рис. 1. Термограмма границы соприкосновения филамента со столом*
- *Fig. 1. Thermogram of the border of contact between the filament and the table*

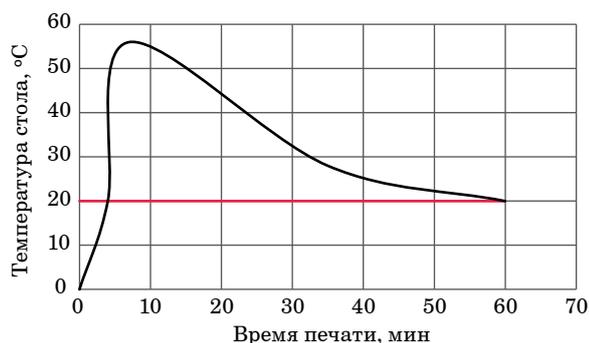
трудера. Расплавляясь, пластик проходит через сопло и затем попадает на рабочую поверхность. При переходе пластика через составные части печатающего устройства наблюдается падение температуры филамента (табл. 2), что регистрируется с помощью метода термографии (рис. 2–5).

График изменения температуры филамента в процессе печати (рис. 6) можно разделить на следующие области:

область I: соответствует подготовке к печати – нагреву филамента и рабочего стола до заданной программой температуры;

- Таблица 2. Изменение температуры филамента в процессе печати
- Table 2. Change in filament temperature during printing

Температура филамента	Значение температуры, °C	Значение падения температуры филамента, °C
Номинальная на панели управления	230	При выходе из сопла – 121,1; при переходе на рабочий стол – 41,3
На выходе из сопла	104,9	
Напечатанной детали	63,6	



- Рис. 2. Динамика температуры стола 3D-принтера в процессе печати с закрытой крышкой
- Fig. 2. Dynamics of the temperature of the 3D printer table during printing with the lid closed



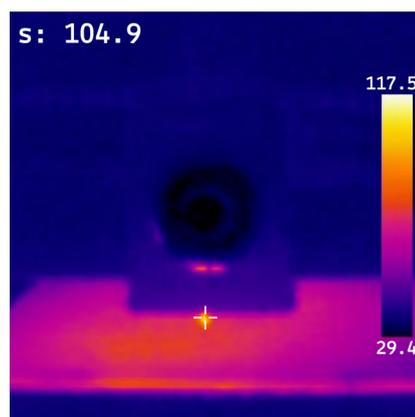
- Рис. 3. Значение номинальной температуры сопла на панели управления
- Fig. 3. Nozzle nominal temperature value on the control panel

область II: соответствует остыванию филамента при выходе из сопла перед началом нанесения филамента на рабочую поверхность;

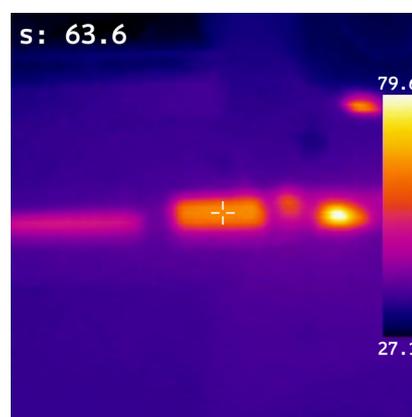
область III: соответствует процессу нанесения филамента на рабочую поверхность;

область IV: соответствует процессу остывания филамента после печати.

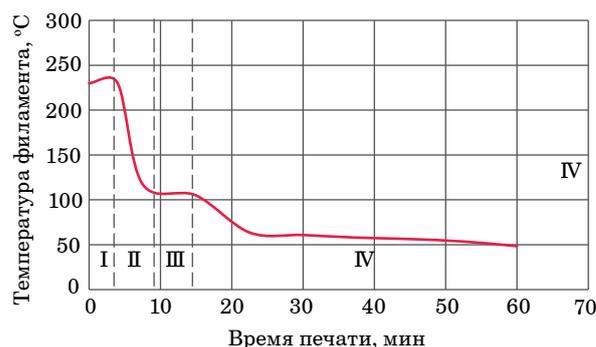
Резкое падение температуры филамента при его переходе из сопла на рабочую поверхность в процессе 3D-печати может провоцировать появление следующих дефектов изделия: слабая



- Рис. 4. Термограмма филамента на выходе из сопла
- Fig. 4. Thermogram of the filament at the outlet of the nozzle



- Рис. 5. Термограмма напечатанной детали
- Fig. 5. Thermogram of the printed part



- Рис. 6. Динамика температуры филамента в процессе печати
- Fig. 6. Dynamics of filament temperature during printing

связанность элементов детали друг с другом, наплавление лишнего материала на поверхности изделия, деформация углов детали, искривление поверхности детали, плохое качество поверхности на линии соприкосновения с опорой. Также

из-за особенностей FFF-печати возможно образование остаточных напряжений на поверхности готового изделия, что значительно сказывается на его износостойкости и прочности. С учетом хрупкости PLA-пластика, данные побочные эффекты технологии сильно снижают качество изделий из PLA и, как следствие, область его применения.

Заключение

Данные об исследовании температурных режимов FFF-устройств для послойного синтеза полимерных изделий актуальны для решения проблемы калибровки температур принтера. Сведение к минимуму нарушений температурных режимов в процессе печати снизит дефектность производимых деталей более чем на 40 % [3], что существенно скажется на качестве аддитивных изделий и расширит область применения технологий послойного синтеза. Кроме того, на

основе полученных данных возможны модернизация существующих FFF-устройств с созданием универсальных температурных условий и расширение сферы применения существующих теоретических моделей технологий 3D-печати.

Температурный режим 3D-печати непосредственно влияет как на процесс производства аддитивного изделия, так и на конечный результат печати. PLA-пластик по своим характеристикам является одним из самых легких материалов для печати, тем не менее существующие технологии в полной мере не обеспечивают высокое качество печати с использованием пластика. С совершенствованием технологии послойного синтеза повысятся такие характеристики, как качество конечного продукта и его технико-экономические показатели.

Успешное внедрение аддитивных технологий позволит наукоемким предприятиям в полной мере использовать потенциал научно-технического комплекса для решения задач, которые стоят на повестке Индустрии 4.0.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белов П. С., Махов С. Л. Анализ дефектов изделий, получаемых методами аддитивных технологий // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 1 (91). С. 8–13.
2. Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластика, получаемых методом 3D-печати // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. № 4 (44). С. 765–776.
3. Семенова Е. Г., Чабаненко А. В. Анализ и синтез организационно-технических решений при аддитивном производстве // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2018. № 1 (1). С. 33–40.
4. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова, Е. В. Гасперович, А. И. Ермаков, В. В. Литвяк // Наука и техника. 2022. № 2. С. 107–113.
5. Вержаковская М. А., Аронов В. Ю., Осанов В. А. Технологии аддитивного производства как наиболее приоритетные современные цифровые технологии // Инновации. 2018. № 7 (237). С. 23–27.
6. Зленко М. Л., Попович А. А., Мутылина И. Н. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во политех. ун-та, 2013. 222 с.
7. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы). СПб.: Ун-т ИТМО, 2015. 63 с.

REFERENCES

1. Belov P. S., Mahov S. L. Analysis of defective products, we get urgentem methods additivn urgentem technology. Science and business: putty developments. 2019;(1(91)):8–13. (In Russ.).
2. Petrov V. M., Bezpachuk S. N., Yakovlev S. P. On the influence of structure on the strength of plastic products obtained by 3D printing. Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the sea and river fleet. 2017;(4(44)):765–776. (In Russ.).
3. Semenova E. G., Chabanenko A. V. Analysis and synthesis of organizational and technical solutions in additive manufacturing. Automation and simulation in design and management. 2018;(1(1)):33–40. (In Russ.).
4. Ermakova V. A., Kasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvyak V. V. Investigation of strength characteristics of products obtained by 3D printing from PLA. Science and technology. 2022;(2):107–113. (In Russ.).
5. Verzhakovskaya M. A., Aronov V. Yu., Usanov V. A. Additive manufacturing technologies as the most priority modern digital technologies. Innovations. 2018;(7(237)):23–27. (In Russ.).

6. Zlenko M. A., Popovich A. A., Mutylyna I. N. Additive technologies in mechanical engineering. SPb.: Publishing House of Polytechnical University; 2013. 222 p. (In Russ.).
7. Valetov V. A. Additive technologies (state and prospects). SPb.: Publishing House of ITMO University; 2015. 63 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Назаревич Станислав Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – оценка технического уровня, анализ состояния организационных систем.

Свириденко Анастасия Вячеславовна, студентка кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – управление качеством процесса послойного синтеза и изделий аддитивного производства.

Nazarevich Stanislav A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – assessment of the technical level, analysis of the state of organizational systems.

Sviridenko Anastasia V., Student at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – quality control of the layer-by-layer synthesis process and additive manufacturing products.

Поступила в редакцию 05.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 05.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 28.04.2023

Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи

Александр Владимирович Рысин¹

✉ Galewon@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-0968-320X

Сергей Валентинович Солёный¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается задача интегральной оценки воздушных линий электропередачи. Проанализирована процедура диагностики и анализа отказов, основанная на методах искусственного интеллекта. Предложена возможность использования робототехнических средств на базе автономных мобильных роботов. Рассмотрена идея создания автономной роботизированной интеллектуальной системы оценки воздушных линий электропередач, включающей в себя беспилотные аппараты, комплекс диагностических средств и серверы интеллектуальной обработки информации.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, техническое состояние электрооборудования, аварийное отключение, каскадные аварии, системы электроснабжения, диагностика электрооборудования

Для цитирования: Рысин А. В., Солёный С. В. Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 56–60. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-56-60.

Original article

Assessment of the technical condition of overhead power lines

Aleksandr V. Rysin¹

✉ Galewon@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-0968-320X

Sergey V. Solyonyj¹

ssv555ssv@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-7919-3890

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article deals with the problem of integral assessment of overhead power lines. The procedure for diagnostics and failure analysis based on artificial intelligence methods is considered. The possibility of using robotic means based on autonomous mobile robots is proposed. The possibility of creating an autonomous robotic intelligent assessment of overhead power lines, including unmanned vehicles, a set of diagnostic tools and servers for intelligent information processing, is considered.

Keywords: reliability of power supply, technical condition of electrical equipment, emergency shutdown, cascade accidents, power supply systems, diagnostics of electrical equipment

For citation: Rysin A. V., Solyonyj S. V. Assessment of the technical condition of overhead power lines. Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation. 2023;2(4):56–60. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-56-60.

Введение

Исследования статической и динамической устойчивости энергетических систем привели к выводам, что аварийные отключения электрооборудования и каскадные аварии остаются серьезными проблемами при решении задачи повышения надежности электроснабжения [1]. В результате исследований был спроектирован робот для перемещения непосредственно по проводу и сбора параметров и характеристик, которые потом используются для оценки технического состояния электрооборудования, что позволяет выявлять дефектные места заблаговременно.

Для обработки этих параметров синтезирована информационно-аналитическая модель.

Материал и методы исследования

Информационно-аналитическая модель оценки технического состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) основана на нейронно-нечетком выводе и предназначена для использования оператором робота с целью определения необходимости ремонта или реновации оборудования.

Информационно-аналитическая система служит вторичной системой для альтернативного

формирования решений по диагностике состояния ВЛЭП, поскольку окончательное решение принимает оператор [2].

Каждый из рассматриваемых классов напряжения ВЛЭП представлен отдельной моделью. Это означает, что система нейронно-нечеткого вывода формируется отдельно для 35, 110 и 220 кВ. По принципу декомпозиции каждая модель, в свою очередь, представляет собой совокупность объектов, каждый из которых содержит множество элементов. Например, для ВЛЭП на 35 кВ система оценки технического состояния A состоит из пяти объектов оценки состояния и соответствует формуле:

$$A = B \cup C \cup E \cup D \cup F,$$

где B – оценка состояния эстакады ВЛ; C – оценка состояния пролета; D – оценка состояния опор ВЛЭП; E – оценка состояния изоляторов; F – оценка состояния высокочастотного фильтра.

Каждый объект представляет собой набор элементов. Например, состояние пролета ВЛЭП описывается состоянием его элементов: оценка состояния провода; оценка состояния грозотроса; оценка состояния болтовых соединений ВЛ:

$$B = G_B \cup H_B \cup I_B,$$

$$C = G_C \cup H_C \cup I_C,$$

$$D = G_D \cup H_D \cup I_D,$$

$$E = G_E \cup H_E \cup I_E,$$

$$F = G_F \cup H_F \cup I_F.$$

В этом случае каждый элемент характеризуется несколькими групповыми параметрами, определяемыми в ходе сбора информации робототехническим комплексом, а также при сборе данных с датчиков и систем диагностики [3].

Например, анализируются следующие параметры для оценки состояния проводов ВЛЭП: количество оборванных и поврежденных проводов и изоляторов; количество дефектных болтовых соединений; оценка величины провеса ВЛЭП; температура токоведущих частей, окружающей среды; влажность воздуха; ток и его частота в исследуемом проводе; относительное количество повреждений изоляторов; углы наклона опор и т. д. [4].

Все эти данные собираются робототехническим комплексом и набором стационарных датчиков, однако возможно также применение беспилотных летательных аппаратов. Использование мультикоптеров, в свою очередь, значительно увеличивает возможности мобильной платформы в контексте диагностики: мобильная платформа может перемещаться только по проводу, в то время как муль-

тикоптер может удаляться от исследуемой ВЛЭП на расстояние 1–2 км, что позволяет обеспечить визуальный осмотр большего числа электрооборудования, что актуально в тех случаях, когда проход вдоль опор ВЛЭП невозможен по причинам заросшего ландшафта, горных склонов, незаконных застроек и т. п. Также появляется возможность одновременной диагностики нескольких мощностей линии на расстоянии менее 2 км друг от друга [5].

Использование нескольких беспилотных аппаратов совместно с одной мобильной платформой позволяет не только обеспечить диагностике непрерывность, но и усовершенствовать комплекс за счет «выживания» в случае отказа одного из аппаратов исследования.

Автоматическое управление движением подвижной платформы необходимо для эффективной роботизированной диагностики. С одной стороны, это отдельная комплексная проблема, которая, среди прочего, требует юридического согласования по эксплуатации беспилотных транспортных систем по дорогам общего пользования вне специализированных полигонов [6]. С другой стороны, единичное простое перемещение по обозначенному маршруту с остановками в заранее определенных точках с благоприятными условиями для взлета и посадки транспортных средств достаточно для диагностики линии электропередач с помощью одного или несколько мультикоптеров.

Сегодня проблема может быть решена за счет использования оператора без специальных навыков, если все управление мультикоптерами, сбор и обработка данных выполняются автоматически. Однако многие специалисты работают над интеллектуальным управлением транспорта, как для дорожного, так и для движения по пересеченной местности [7].

Для функций, выполняющихся в автоматическом режиме, роботизированный способ диагностики, предназначенный для диагностики ЛЭП, должен состоять из следующего оборудования: мультикоптеры и мобильный робот, предназначенные для сбора данных, диагностическое навесное оборудование, серверы обработки и управления данными, устройства связи.

Для выполнения задачи диагностики робототехнический комплекс и мультикоптеры должны иметь длительное время работы – более 45 мин, грузоподъемность более 2 кг, а также радиус действия не менее 5 км.

Это позволит избежать составления вероятностных моделей и выполнить диагностику на основе информационно-аналитической модели ВЛЭП для каждого класса напряжения [8].

Дополнительно для оценки технического состояния воздушных линий электропередачи

используются математические данные с входными параметрами, которые изменяются и регистрируются в реальном времени с помощью описанных выше технологий. Основные проблемы моделирования включают в себя применение неподходящих технологий, погрешность оборудования и процессов потери электроэнергии при передаче.

Сопротивление проводника производит тепло, которое рассеивается в окружающую среду и называется омическими потерями. Кроме того, если приложенное напряжение превышает критический уровень, возникает другой тип потери мощности, называемый эффектом коронирования. Потери мощности накапливаются по мере протекания индуцированного тока и распространения коронного эффекта вдоль линий электропередачи.

Потери мощности могут привести к потере значительной части передаваемой мощности, поскольку линии электропередачи обычно проходят на большие расстояния, иногда на несколько сотен километров. Общее влияние потерь электроэнергии на систему заключается в уменьшении количества электроэнергии, доступной потребителям. Таким образом, должны быть приняты надлежащие меры для снижения потерь электроэнергии до минимума.

Применение законов Кирхгофа помогло в выводе математических выражений в форме уравнений в частных производных с практическими граничными условиями, которые описывают поток электроэнергии по линиям электропередачи. Затем мы использовали решение полученных уравнений математической физики для прогнозирования параметров сети, таких как ток и напряжение вдоль линий электропередачи.

Результаты исследования и их обсуждение

Были проведены исследовательские работы по минимизации потерь электроэнергии, в которых рассмотрели минимизацию потерь мощности в распределительных сетях с помощью реструктуризации фидеров, внедрения метода распределенной генерации и размещения конденсаторов. Реконфигурация фидера применяется для уменьшения потерь в системе распределения с распределенными генераторами, используются оптимальное значение потока мощности на основе роевого интеллекта и эволюционные вычисления для улучшения стабильности напряжения.

В большинстве вышеупомянутых методов большое внимание уделяется снижению потерь с использованием реконфигурации фидера, вне-

дрению распределенной генерации и размещению конденсаторов, что экономически невыгодно. Наиболее подходящим подходом будет сочетание математического моделирования с математической точностью классического метода оптимизации для минимизации потерь мощности.

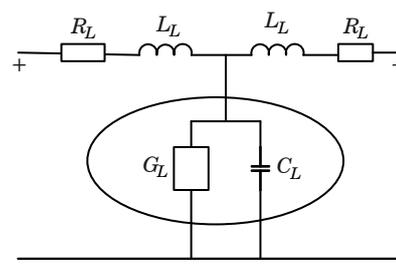
Для этого применяли классический метод оптимизации без учета того факта, что величина напряжения изменяется вдоль линий электропередачи. В математической модели для определения потерь мощности на типичных линиях электропередачи будут использоваться расчетные и реальные потери тока и напряжения вдоль линий. Изучение классического метода оптимизации помогло сформулировать оптимальную стратегию минимизации потерь мощности на линиях электропередачи.

Реальная линия передачи будет иметь некоторое последовательное сопротивление, связанное с потерями мощности в проводнике. Также может быть некоторая проводимость шунта, если изоляционный материал, удерживающий два проводника, имеет некоторый ток утечки. Следовательно, сопротивление и проводимость влияют на потери мощности на линиях электропередачи. Поэтому мы формулируем модель для линии передачи с потерями, в которой учитывается влияние последовательного сопротивления R и проводимости шунта G .

Здесь нас интересует величина погрешности между теоретическими и реальными данными тока и напряжением от их входных значений на элементарной части линии передачи. Таким образом, мы рассматриваем эквивалентную схему линии электропередачи длиной L , содержащую сопротивление R_L , емкость C_L , индуктивность L_L и проводимость G_L , как показано на рисунке.

По закону Кирхгофа:

$$U = 0,5R_L I + 0,5L_L \frac{\partial I}{\partial t} + 0,5L_L \left[\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial \Delta I}{\partial t} \right] + 0,5R_L [I + \Delta I],$$



- *Схема замещения*
- *Equivalent circuit*

где сумма всех напряжений ветвей равна нулю. Если принимать L минимально возможным, то можно сократить выражение до:

$$\frac{\partial U}{\partial L} = - \left[RI + L \frac{\partial I}{\partial t} \right].$$

Теперь составим токовое уравнение с минимально возможным L и получим:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial t \partial L} = - \left[C \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + G \frac{\partial U}{\partial t} \right].$$

Дифференциальные уравнения в частных производных описывают поток тока и напряжения на линии передачи с потерями. Дифференцируя относительно L и t , получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial L^2} &= - \left[L \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial L} + R \frac{\partial I}{\partial L} \right]; \\ \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial L} &= - \left[C \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + G \frac{\partial U}{\partial t} \right]. \end{aligned}$$

Подставляя полученные дифференциалы в ранее выведенные соотношения, получаем:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial L^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + CR \frac{\partial I}{\partial t} + RGI + GL \frac{\partial I}{\partial t}.$$

Уравнения представляют собой гиперболические дифференциальные уравнения в частных производных для линий передачи с потерями. Это выражения, отображающие поток электроэнергии вдоль линий электропередачи, и они управляют потоком тока и напряжения по линиям.

Заключение

С помощью совмещения робототехнических средств для сбора данных и математических моделей можно получить киберфизическую систему для диагностики электрооборудования. С использованием системы обработки больших данных и вероятностных моделей создается следящая система, способная отслеживать потенциальные слабые узлы системы электроснабжения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рысин А. В., Кузьменко В. П., Соленая О. Я. Моделирование переходных процессов в энергосистемах // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Тезисы докл. I Междунар. форума. СПб., 10–11 нояб. 2021 г. СПб.: ГУАП, 2021. С. 259–260.
2. *Khalyasmaa A. I., Dmitriev S. A., Romanov A. M.* Robotic intelligence laboratory for overhead transmission lines assessment // 57th International scientific conference on power and electrical engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia, 2016. Riga, 2016. P. 1–6.
3. Рысин А. В., Кузьменко В. П. Вычислительная модель киберфизической энергосистемы // Наука и бизнес: пути развития. 2021. № 12 (126). С. 14–16.
4. Характеристики и параметры технического состояния воздушных линий электропередачи / О. Я. Соленая, А. В. Рысин, С. В. Соленый [и др.] // Известия высших учеб. завед. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 583–588. Doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-583-588.
5. Robot for inspection and maintenance of overhead power lines / S. Solyonyj [et al.] // Smart innovation, systems and technologies. 2021. Vol. 187. P. 487–497.
6. Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning / V. F. Shishlakov [et al.] // JOP conference series: Metrological support of innovative technologies. Vol. 1515. Krasnoyarsk, 4 Mart 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 52083. (In Russ.).
7. Robotic power line maintenance systems / S. V. Solyonyj [et al.] // IOP conference series: Materials science and engineering. Vol. 734. Krasnoyarsk, 18–21 November 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. P. 12200. (In Russ.).
8. Моделирование режимов работы электроэнергетической системы с целью повышения ее устойчивости функционирования / В. Ф. Шишляков, О. Я. Соленая, А. В. Рысин, С. В. Соленый // Датчики и системы. 2019. № 4 (235). С. 30–38.

REFERENCES

1. Rysin A. V., Kuzmenko V. P., Solenaya O. Ya. Modeling of transient processes in power systems // Mathematical methods and models in high-tech production: Abstracts of the I International forum. SPb., 10–11 November 2021. SPb.: SUAI; 2021, pp. 259–260. (In Russ.).
2. Khalyasmaa A. I., Dmitriev S. A., Romanov A. M. Robotic intelligence laboratory for overhead transmission lines assessment. 57th International scientific conference on power and electrical engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, Latvia, 2016. Riga; 2016, pp. 1–6.
3. Rysin A. V., Kuzmenko V. P. Computational model of the cyber-physical energy system. Science and business: ways of development. 2021;(12(126)):14–16. (In Russ.).
4. Solenaya O. Ya., Rysin A. V., Solenyi S. V. et al. Characteristics and parameters of the technical condition of overhead transmission lines. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Instrumentation. 2021;64(7):583–588. (In Russ.). Doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-583-588.
5. Solyonyj S., Solenaya O., Rysin A. et al. Robot for inspection and maintenance of overhead power lines. Smart innovation, systems and technologies. 2021;187:487–497.
6. Shishlakov V. F., Solenaya O. Ya., Solyonyj S. V. et al. Modeling of the operation modes of the electric power system to improve its sustainability of functioning. JOP conference series: Metrological support of innovative technologies. Vol. 1515. Krasnoyarsk, 04 March 2020; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited; 2020, pp. 52083. (In Russ.).
7. Solyonyj S. V., Shishlakov V. F., Solenaya O. Ya. et al. Robotic power line maintenance systems. IOP conference series: Materials science and engineering. Vol. 734. Krasnoyarsk, 18–21 November 2019; Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited; 2020, pp. 12200. (In Russ.).
8. Shishlakov V. F., Solenaya O. Ya., Rysin A. V., Solyony S. V. Simulation of operating modes of the electric power system in order to increase its stability of functioning. Sensors and systems. 2019;(4(235)):30–38. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рысин Александр Владимирович, аспирант кафедры электромеханики и робототехники Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – электроэнергетика и электротехника, робототехника, методы автоматизации в электроэнергетике.

Солёный Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, директор Инженерной школы Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – автоматизация, робототехника, электроэнергетика.

Rysin Alexander V., Postgraduate Student at the Department of Electromechanics and Robotics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – electric power industry and electrical engineering, robotics, automation methods in the electric power industry.

Solyonyj Sergey V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head at the Department of Electromechanics and Robotics, Director at the School of Engineering, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – automation, robotics, electric power industry.

Поступила в редакцию 08.02.2023

Поступила после рецензирования 15.02.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 08.02.2023

Revised 15.02.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья
УДК 621.396

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-61-67

Сравнительный анализ классической и интеллектуальной систем автоматического управления углом крена низколетящего аппарата

Михаил Евгеньевич Иванов¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946

Владимир Васильевич Езерский¹

ezerskiy2010@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1223-6841

Александр Андреевич Беляков¹

kaf13belyakov@gmail.com

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Проведен сравнительный анализ системы управления углом крена летательного аппарата, устойчивость которой обеспечивается классическими методами оптимизации передаточной функции и звеньями обратной связи, и аналогичной системы, устойчивость которой достигнута применением фаззи-регулятора. Синтез регулятора произведен с применением одного из методов искусственного интеллекта – нечеткой логики. Моделирование работы всех систем произведено с помощью пакетов MatLab R2015a – Simulink и Fuzzy Logic Toolbox.

Ключевые слова: сравнительный анализ, искусственный интеллект, система автоматического управления, нечеткий регулятор, переходный процесс

Для цитирования: Иванов М. Е., Езерский В. В., Беляков А. А. Сравнительный анализ классической и интеллектуальной систем автоматического управления углом крена низколетящего аппарата // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 61–67. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-61-67.

Original article

Comparative analysis of classical and intelligent systems of automatic roll angle control of a low-flying vehicle

Mikhail E. Ivanov¹

✉ sindbad1995@list.ru, orcid.org/0000-0002-7584-6946

Vladimir V. Ezerskiy¹

ezerskiy2010@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-1223-6841

Alexander A. Belyakov¹

kaf13belyakov@gmail.com

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. A comparative analysis of the roll angle control system of the aircraft, the stability of which is provided by classical methods of optimizing the transfer function and astatic links, and a similar system, the stability of which is achieved by using a fuzzy controller. This regulator is based on one of the methods of artificial intelligence – fuzzy logic. Simulation of all systems was performed using MatLab R2015a – Simulink and Fuzzy Logic Toolbox packages.

Keywords: comparative analysis, artificial intelligence, automatic control system, fuzzy controller, transient process

For citation: Ivanov M. E., Ezerskiy V. V., Belyakov A. A. Comparative analysis of classical and intelligent systems of automatic roll angle control of a low-flying vehicle. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):61–67. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-61-67.

Введение

К современной авиационной технике предъявляются повышенные требования по быстродействию, качеству, надежности, безопасности полета и другим критериям. Научно-технический прогресс с каждым годом позволяет удовлетво-

рять все больше запросов проектировщиков и производителей техники, касающихся не только материалов с улучшенными характеристиками, но и программного обеспечения, которое позволяет достигать лучшего качества работы управляющих систем, чем его более ранние аналоги [1, 2]. Все чаще в контуре систем управления при-

меняются регуляторы, использующие методы искусственного интеллекта для улучшения показателей качества и устойчивости [3]. В данной статье проведено исследование качества работы системы автоматического управления (САУ) углом крена низколетящего аппарата типа экраноплана, ее устойчивость поддерживается двумя способами – классическими звеньями астатизма и интеллектуальным нечетким регулятором.

Математическая и программная реализация классической системы управления

Пусть закон управления элеронами, с помощью которых осуществляется крен летательного аппарата (ЛА), имеет вид [4, 5]:

$$\delta_3 = K_{i\gamma} \int (\gamma - \gamma_3) dt + K_\gamma \gamma + K_\omega \omega, \quad (1)$$

где γ – реальное значение угла крена; γ_3 – заданное значение входным воздействием системы управления; $K_{i\gamma}$ – коэффициент системы по крену; K_ω – коэффициент системы по угловой скорости вращения вокруг продольной оси ЛА; $K_\gamma \gamma$ – дополнительное звено системы, обеспечивающее ее устойчивость.

Знак интеграла перед разностью между γ и γ_3 делает систему астатической, что необходимо для компенсации ошибок регулирования. Коэффициент системы по крену $K_{i\gamma}$ и коэффициент по угловой скорости K_ω определяют качество переходного процесса САУ. Добавление в систему звена $K_\gamma \gamma$ обеспечивает устойчивость всей системы, без этого важного компонента вся САУ будет неустойчива при любых значениях $K_{i\gamma}$ и K_ω .

Передаточная функция САУ углом крена γ выглядит следующим образом:

$$W_\gamma(s) = \frac{8s + 1}{4s^2 + 32s + 1}. \quad (2)$$

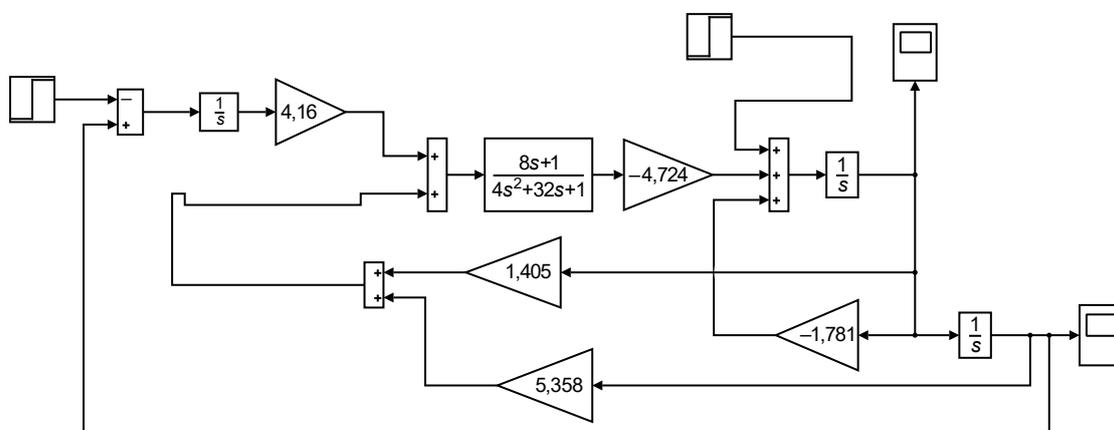
Тогда схема такого измерителя с учетом действия возмущающего момента угловой скорости крена M_ω и момента случайных погрешностей M^δ примет вид, показанный на рис. 1. При этом коэффициенты $K_{i\gamma}$ и K_ω оптимизированы, если известны возмущающие моменты $M^\delta = -4,724$; $M_\omega = -1,781$. Моделируемое на входе системы входное воздействие – единичная скачкообразная функция Хевисайда с параметрами:

$$\begin{cases} \text{Step Time} = 1, \\ \text{Initial Value} = 0, \\ \text{Final Value} = 1, \\ \text{Sample Time} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

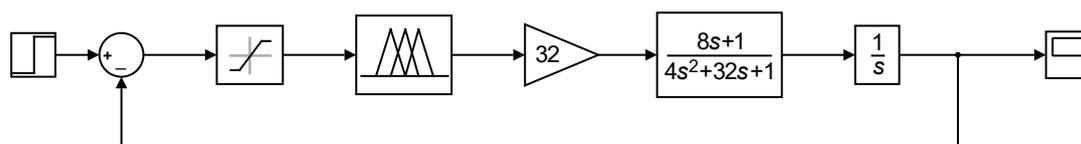
Программная реализация системы управления с элементом искусственного интеллекта – нечетким регулятором

Измеритель угла крена с аналогичной передаточной функцией $W_\gamma(s) = \frac{8s + 1}{4s^2 + 32s + 1}$, использующий звено фаззи-регулятора (Fuzzy Logic Controller) для поддержания устойчивости всей системы, изображен на рис. 2.

Таким образом, основным и самым трудоемким процессом в ходе синтеза интеллектуальной САУ является настройка регулятора Fuzzy Logic Controller, использующего нечеткую логику как один из методов искусственного интеллекта [6]. Задачами настройки являются формирование функций принадлежности входного и выходного



• Рис. 1. Система автоматического управления углом крена (по каналу крена и угловой скорости)
 • Fig. 1. Automatic roll angle control system (by roll channel and angular velocity)



• Рис. 2. Система автоматического управления углом крена с нечетким регулятором
 • Fig. 2. Automatic roll angle control system with fuzzy controller

блоков нечеткой системы, а также базы решающих правил, обеспечивающих связь выходных функций принадлежности со входными.

Блок Saturation ограничивает минимальное и максимальное значения входного сигнала в интервале $[-0,5; 0,5]$, усилительное звено Gain с коэффициентом усиления $k = 32$ обеспечивает лучшее качество переходного процесса САУ.

Алгоритм настройки регулятора

На следующем этапе осуществляется синтез нечеткой системы регуляции в блоке Fuzzy Logic Controller с помощью программного пакета Fuzzy Logic Toolbox в MatLab [7, 8]:

1) задаются входные лингвистические переменные α , для каждой из которых составляются функции принадлежности $\mu_N(x)$ треугольного типа (trimf) в количестве N штук;

2) аналогично задаются выходные лингвистические переменные (term) β с M треугольными (trimf) функциями принадлежности $\mu_M(y)$;

3) перед дефаззификацией входных лингвистических переменных на выходе в центральном блоке нечеткой системы записываются правила (Rules) вида «if < input 1 is α_i > then < output 1 is β_j >»;

4) анализируется полученная статическая характеристика «output1(input1)» синтезированной нечеткой системы.

На основании перечисленных общих правил составления фаззи-систем был выработан следующий эмпирический алгоритм синтеза нечеткой системы.

1. Составлено девять термов с лингвистическими переменными и заданными функциями принадлежности «trimf» на универсальном множестве $[-1; 1]$. На рис. 3 показана реализация данного процесса в Fuzzy Logic Toolbox. В табл. 1 приведены названия лингвистических переменных и интервалы, в которых находятся их функции принадлежности.

Отсутствие смещения вершин и координат оснований равнобедренных треугольников функций принадлежности означает то, что выбранная нечеткая система является линейной – значит,

• Таблица 1. Исходные данные для синтеза нечеткой системы

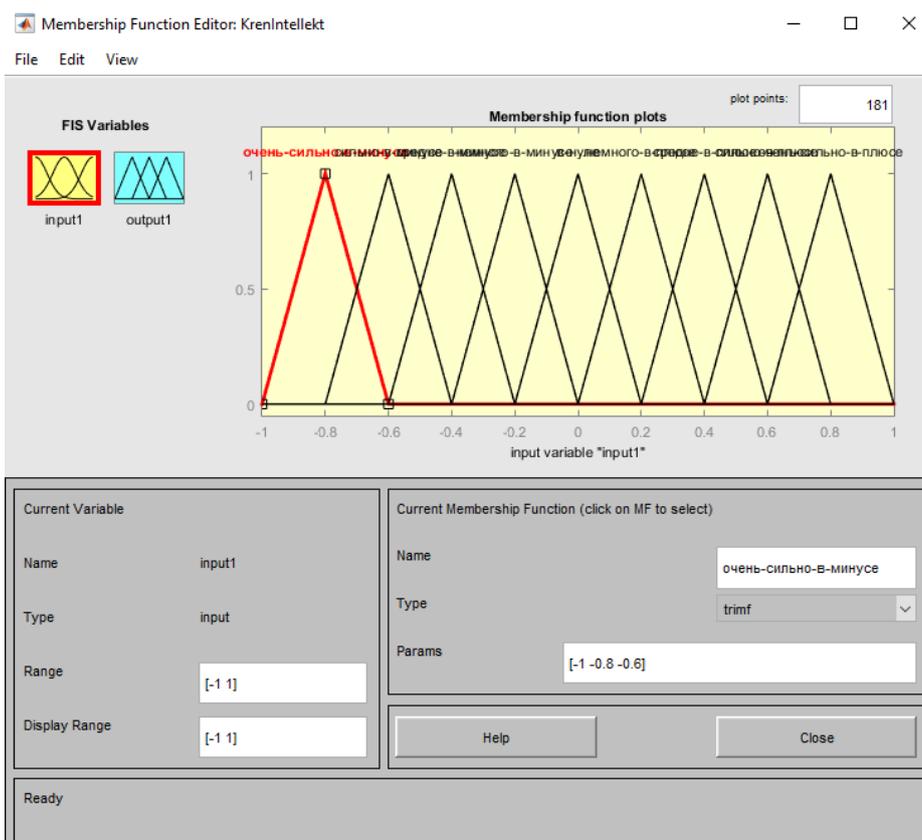
• Table 1. Initial data for fuzzy system synthesis

Название термина лингвистических переменных (и для «input», и для «output»)	Интервалы параметров и координаты вершин функций принадлежности в MatLab
«Очень-сильно-в-минусе»	$[-1 -0.8 -0.6]$
«Сильно-в-минусе»	$[-0.8 -0.6 -0.4]$
«Средне-в-минусе»	$[-0.6 -0.4 -0.2]$
«Немного-в-минусе»	$[-0.4 -0.2 0]$
«В-нуле»	$[-0.2 0 0.2]$
«Немного-в-плюсе»	$[0 0.2 0.4]$
«Средне-в-плюсе»	$[0.2 0.4 0.6]$
«Сильно-в-плюсе»	$[0.4 0.6 0.8]$
«Очень-сильно-в-плюсе»	$[0.6 0.8 1]$

и сам синтезируемый регулятор линейный. На практике в большинстве случаев смещение вершин и координат оснований треугольных функций принадлежности, которое делает фаззи-регулятор нелинейным, позволяет добиться наибольшего качества переходного процесса. Однако ниже будет показано, что для интеллектуальной САУ угла крена применение линейного фаззи-регулятора достаточно для получения необходимого качества переходного процесса.

2. Выбранный алгоритм дефаззификации (тип нечеткой системы) – Мамдани. Это подразумевает нечеткий вывод значений на выходе, которые задаются аналогичными входными функциями принадлежности с такими же лингвистическими переменными. Применение алгоритма Сугено с четкими значениями функции $f(u)$ на выходе в большинстве случаев позволяет достичь большего качества дефаззификации нечеткой системы, однако в случае исследуемой интеллектуальной САУ углом крена с алгоритмом Мамдани возможно получение требуемого по качеству переходного процесса.

3. В блоке Rule Editor формируется база решающих правил, которые, в конечном итоге, максимально сгладят значение перерегулирования, минимизируют ошибку регулирования и уменьшат время $t_{\text{п}}$ переходного процесса.



- *Рис. 3. Формирование функций принадлежности в окне Membership Function Editor входного блока фаззи-системы (функции принадлежности аналогичны и для выходного блока «output»)*
- *Fig. 3. Formation of membership functions in the Membership Function Editor window of the input block of the fuzzy system (membership functions are similar for the output block “output”)*

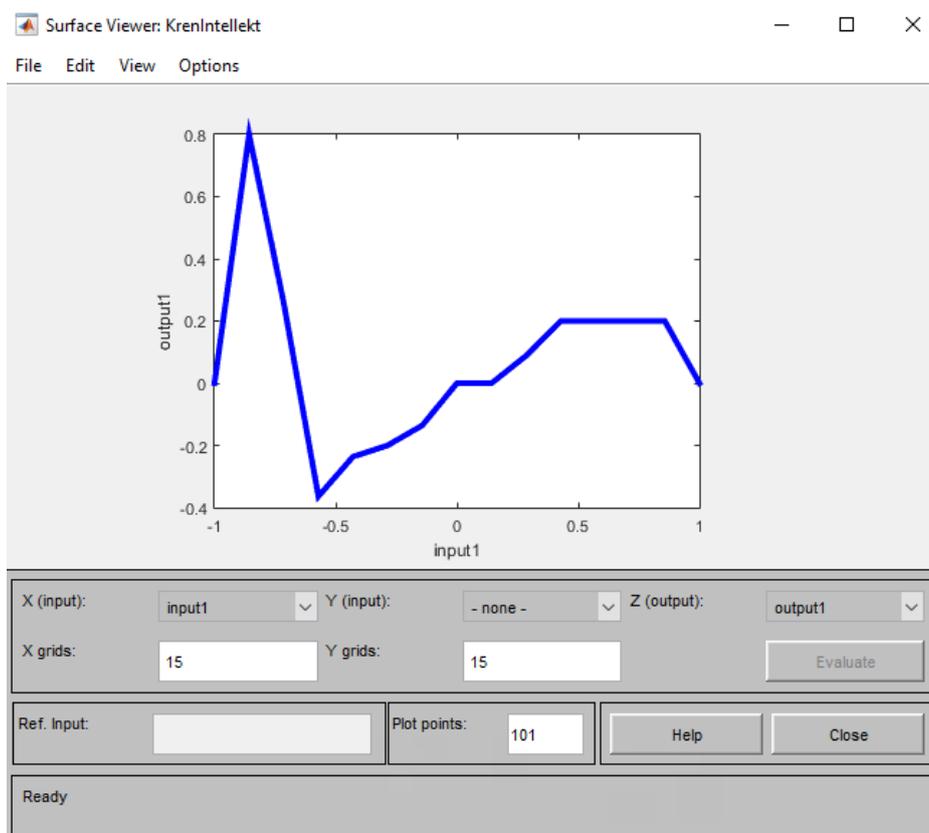
- *Таблица 2. Правила нечеткой системы*
- *Table 2. Rules of the fuzzy system*

If	Then
Input1 is – «Очень-сильно-в-минусе»	Output1 is – «Очень-сильно-в-плюсе»
Input1 is – «Сильно-в-минусе»	Output1 is – «Средне-в-минусе»
Input1 is – «Средне-в-минусе»	Output1 is – «Немного-в-минусе»
Input1 is – «Немного-в-минусе»	Output1 is – «Немного-в-минусе»
Input1 is – «В-нуле»	Output1 is – «В-нуле»
Input1 is – «Немного-в-плюсе»	Output1 is – «В-нуле»
Input1 – «Средне-в-плюсе»	Output1 – «Немного-в-плюсе»
Input1 – «Сильно-в-плюсе»	Output1 – «Немного-в-плюсе»
Input1 is – «Очень-сильно-в-плюсе»	Output1 – «Немного-в-плюсе»

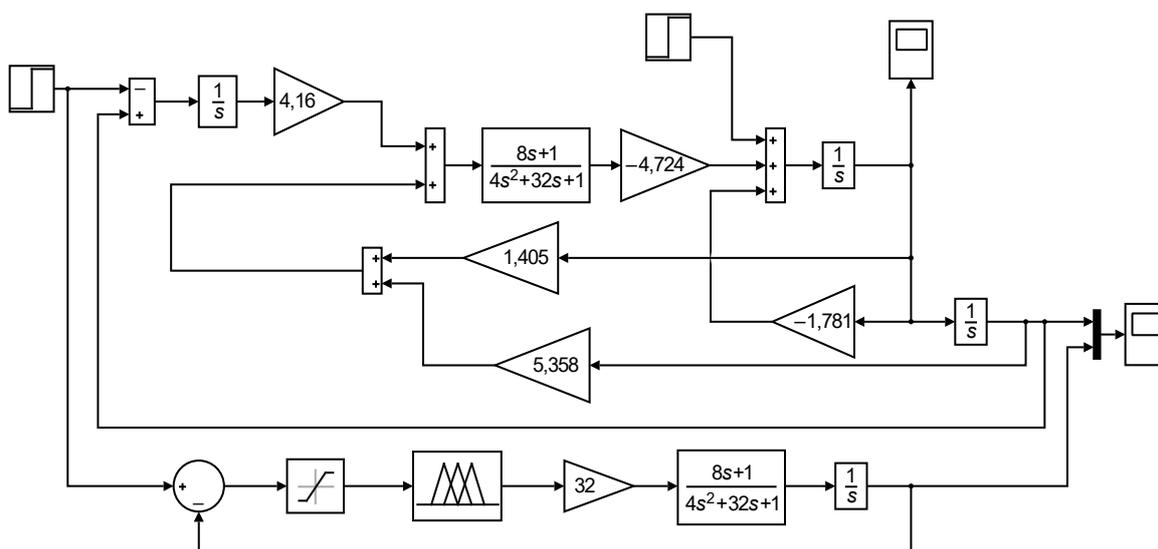
В табл. 2 записано девять правил (по числу лингвистических переменных на входе и выходе системы), которые позволяют получить необходимую статическую характеристику системы (рис. 4) – зависимость значений функций принадлежности на выходе «output» от тех же значений $\mu_M(y)$ на входе «input» $\mu_N(x)$.

Сравнительный анализ классической и интеллектуальной систем управления. Результаты исследования

Для того, чтобы сравнить качество переходных процессов систем управления на рис. 1; 2, необходимо подключить обе САУ параллельно к одному генератору тактовых импульсов (Step) и осциллографу (Scope) (рис. 5) через результирующую шину выходных сигналов (Mux). Исходные данные для моделирования остаются те же: входной сигнал – единичная ступенчатая функция Хевисайда, передаточная функция и классической, и интеллектуальной систем управления угла крена $W_\gamma(s) = \frac{8s + 1}{4s^2 + 32s + 1}$.



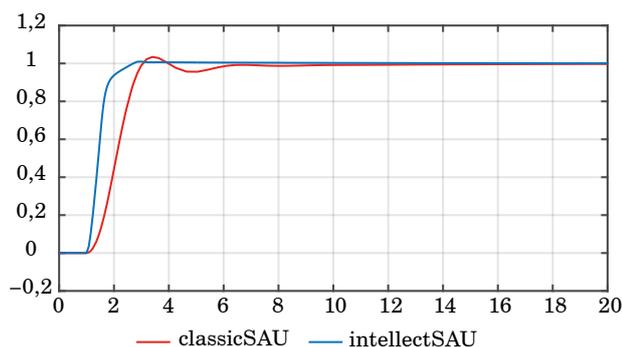
• *Рис. 4. Статическая характеристика синтезированной нечеткой системы*
 • *Fig. 4. Static characteristics of the synthesized fuzzy system*



• *Рис. 5. Параллельное соединение классической и интеллектуальной систем управления углом крена γ*
 • *Fig. 5. Parallel connection of classical and intelligent roll angle control systems γ*

По результатам моделирования были получены следующие графики переходных процессов классической и интеллектуальной систем управления (рис. 6).

Время переходного процесса классической САУ составило $t_{\text{п}}$ (classic) $\approx 6,8$ с, для интеллектуальной САУ аналогичный показатель $t_{\text{п}}$ (intellect) $\approx 3,1$ с. Таким образом, элемент искусственного



• Рис. 6. Графики переходных процессов классической и интеллектуальной систем управления углом крена γ
 • Fig. 6. Graphs of transients of classical and intelligent roll angle control systems γ

интеллекта – фаззи-регулятора – позволил получить в два раза более качественный переходный процесс по сравнению со стандартными инструментами стабилизации классической САУ (звено обратной связи, оптимальные коэффициенты передаточной функции, звено усиления). Нечеткая регуляция интеллектуальной САУ позволила не только существенно улучшить качество переход-

ного процесса, но также заметно снизить флуктуации, связанные со значением перерегулирования и ошибкой регулирования.

Заключение

По результатам проведенного сравнительного анализа сделано заключение о целесообразности применения элемента искусственного интеллекта в системе автоматического управления углом крена γ низколетящего аппарата. Применение элемента искусственного интеллекта (нечеткого регулятора) в САУ с углом крена γ позволяет значительно улучшить качество переходного процесса и снизить время стабилизации системы, достижения устойчивого режима работы, что имеет решающее значение для небольших высот полета во избежание достижения критических значений углов крена. Это дает возможность заметно снизить вероятность столкновения крылом летательного аппарата с подстилающей поверхностью и повысить результирующий показатель безопасности полета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 13–21. Doi: 10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.
2. Князжский А. Ю. Разработка и исследование алгоритма управления движением низколетящего аппарата над неровной поверхностью, минимизирующего его среднюю высоту: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГУТ им. проф. Бонч-Бруевича, 2018. 135 с.
3. Гридина Н. В., Евдокимов И. А., Солодовников В. И. Построение гибридных нейронных сетей с использованием элементов нечеткой логики // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 2. С. 91–97. Doi: 10.14357/20718594190209.
4. Системы автоматического управления угловым положением. URL: <https://nashaucheba.ru/v26951/?cc=1&page=4> (дата обращения: 01.06.2022).
5. Воробьев В. В., Киселев А. М., Поляков В. В. Системы управления летательных аппаратов. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Жуковского, 2008. 203 с.
6. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 530 с.
7. Андриевская Н. В., Билоус О. А., Семёнов С. С. Методика проектирования нечеткого регулятора на базе ПИ-регулятора в среде Matlab // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. № 6. С. 282–287.
8. Богачев И. С., Коломыцев В. Г. Методика настройки нечеткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11. С. 9–14.

REFERENCES

1. Burakov M. V., Konovalov A. C. Fuzzy supervisor for PID regulator. Information and control systems. 2018;(5):13–21. (In Russ.). Doi: 10.31799/1684-8853-2018-5-13-21.
2. Knyazhskij A. Yu. Development and research of an algorithm for controlling the movement of a low-flying vehicle over an uneven surface, minimizing its average height: cand. tech. sci. diss. SPb.: The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications; 2018. 135 p. (In Russ.).

3. Gridina N. V., Evdokimov I. A., Solodovnikov V. I. Construction of hybrid neural networks using fuzzy logic elements. *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*. 2019;(2):91–97. (In Russ.). Doi: 10.14357/20718594190209.
4. Automatic angular position control systems. Available from: <https://nashaucheba.ru/v26951/?cc=1&page=4> [Accessed 01 June 2022].
5. Vorobiev V. V., Kiselev A. M., Polyakov V. V. Aircraft control systems. Moscow: VVIA Publishing House named after prof. Zhukovsky; 2008. 203 p. (In Russ.).
6. Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. Intelligent information systems and methods of artificial intelligence. Moscow: SIC INFRA-M; 2021. 530 p. (In Russ.).
7. Andrievskaya N. V., Bilous O. A., Semenov S. V. Methodology for designing a fuzzy controller based on a PI controller in MATLAB. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2012;(6):282–287. (In Russ.).
8. Bogachev I. S., Kolomytsev V.G. Technique for adjusting a fuzzy regulator with a nonlinear P-type characteristic by Matlab. *Modern high technologies*. 2020;(11):9–14. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Иванов Михаил Евгеньевич, аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – космонавтика, моделирование аэрокосмических систем управления, методы искусственного интеллекта.

Езерский Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – космические средства и воздействия космотехногенной среды на космические аппараты, системы ориентации и управления космическими аппаратами.

Беляков Александр Андреевич, аспирант кафедры эксплуатации и управления аэрокосмическими системами Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – беспилотные летательные аппараты, летательные аппараты с электрической силовой установкой, мультироторные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), моделирование аэрокосмических систем, системы управления БПЛА, системы передачи данных БПЛА.

Поступила в редакцию 02.03.2023

Поступила после рецензирования 09.03.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Ivanov Mikhail E., Postgraduate Student at the Department of Aerospace Systems Operation and Control, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – cosmonautics, modeling of aerospace control systems, artificial intelligence methods.

Ezerskiy Vladimir V., D. Sc. in Technical Sciences, Professor at the Department of Aerospace Systems Operation and Control, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – space facilities and the effects of the cosmotechnogenic environment on spacecraft, spacecraft orientation and control systems.

Belyakov Alexander A., Postgraduate Student at the Department of Aerospace Systems Operation and Control, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – unmanned aerial vehicles, aircraft with electric propulsion, multirotor unmanned aerial vehicles (UAS), modeling of aerospace systems, UAV control systems, UAV data transmission systems.

Received 02.03.2023

Revised 09.03.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья

УДК 612.822.3, 57.087.1

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-68-75

Оценка синхронизации временных рядов для анализа дезадаптационных расстройств

Александр Олегович Смирнов¹

alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105

Ольга Евгеньевна Дик¹

dick@infran.ru, orcid.org/0000-0001-5056-1779

Елена Александровна Фролова¹

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

Вадим Евгеньевич Титов¹

✉ titovvadim82@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2700-7152

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Метод синхросжатого вейвлетного преобразования применен к определению возможной синхронизации временных рядов, полученных из реактивных паттернов электроэнцефалограмм при ответах мозга на периодические стимулы разных частот. Обнаружены различия в порядках синхронизации этих паттернов в двух группах лиц – здоровых и с дезадаптационными расстройствами.

Ключевые слова: вейвлеты, электроэнцефалограмма, синхронизация

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, соглашение № 22-11-00196.

Для цитирования: Смирнов А. О., Дик О. Е., Фролова Е. А., Титов В. Е. Оценка синхронизации временных рядов для анализа дезадаптационных расстройств // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 68–75. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-68-75.

Original article

Evaluation of time series synchronization for the analysis of disadaptation disorders

Aleksandr O. Smirnov¹

alsmir@guap.ru, orcid.org/0000-0002-6781-2105

Olga E. Dick¹

dick@infran.ru, orcid.org/0000-0001-5056-1779

Elena A. Frolova¹

frolovaelena@mail.ru, orcid.org/0000-0001-9512-3879

Vadim E. Titov¹

✉ titovvadim82@gmail.com, orcid.org/0000-0002-2700-7152

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The method of the synchrosqueezed wavelet transform is applied to determine the possible synchronization of time series obtained from reactive patterns of electroencephalograms during the brain responses to periodic stimuli of different frequencies. Differences in the synchronization orders of these patterns were found in two groups of individuals: healthy persons and persons with disadaptation disorders.

Keywords: wavelets, electroencephalogram, synchronization

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation, agreement no. 22-11-00196.

For citation: Smirnov A. O., Dick O. E., Frolova E. A., Titov V. E. Evaluation of time series synchronization for the analysis of disadaptation disorders. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):68–75. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-68-75.

Введение

Развитие медицины как науки и новые идеи в диагностической медицине ставят все новые за-

дачи по разработке медицинских приборов и комплексов. Использование в медицине новейших компьютерных, измерительных и управляющих технологий позволило разработать новые эффек-

тивные методы для сбора и анализа информации о состоянии пациента. Необходимо помнить, что для новейшего медицинского аппарата математическое обеспечение не менее важно, чем техническое оснащение. Для того, чтобы медицинская инженерия развивалась, необходимо применять различные математические методы и алгоритмы к различным физиологическим сигналам, правильно интерпретировать полученные результаты и систематизировать выводы. Такой процесс и приводит к появлению медицинских измерительных приборов с новыми инструментальными методами исследования.

Деадаптационные расстройства – это серьезная патология, и чем раньше она будет выявлена, тем раньше можно начать лечение и тем эффективнее оно будет. Современный уровень применения вейвлетов для анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) и электрокардиограмм (ЭКГ) охватывает большую часть достижений в теории вейвлет-преобразования, разработанной в 90-е гг. XX в. и широко освещен в работах [1–5]. В сложных медицинских комплексах вейвлет-преобразование стали применять в 1990-х гг. В области массового медицинского обслуживания населения имеются только образцы, в которых вейвлет-преобразование используется для решения задач сжатия данных и фильтрации сигнала ЭКГ или ЭЭГ. Поэтому представляется перспективным использование вейвлет-преобразования для анализа ЭЭГ с целью раннего выявления различных патологий головного мозга. И раскрытие данного вопроса следует начать с анализа синхронизации физиологических ритмов, которые в данной работе представлены временными рядами, полученными из электроэнцефалограмм испытуемых во время ритмической стимуляции.

Синхронизацией считается подстройка ритмов осциллирующих систем, т. е. возникновение определенных соотношений между фазами и частотами этих систем за счет слабого взаимодействия между ними [6]. Для реальных сигналов решение задачи обнаружения синхронизации нетривиально в силу нестационарности сигналов, т. е. постоянного изменения амплитуд, частот и фаз этих сигналов. Это обуславливает необходимость предварительной оценки мгновенных значений частот и фаз взаимодействующих систем. В настоящее время известны различные методы извлечения мгновенных фаз и частот, основанные на преобразовании Гильберта [7] или на вейвлет-преобразовании сигнала [8].

Определение мгновенной фазы и частоты нестационарного сигнала с помощью преобразования Гильберта требует предварительной узкополосной фильтрации, поскольку в противном случае ин-

терпретация мгновенной фазы, полученной после преобразования Гильберта, не имеет физического смысла [6, 7]. Метод расчета мгновенных фаз и частот на основе вейвлет-преобразования сигнала не требует предварительной узкополосной фильтрации и может применяться даже в случае зашумленности сигнала [8, 9]. Для повышения эффективности извлечения мгновенной частоты и фазы из экспериментальных данных с высоким уровнем шума применяется метод синхросжатого вейвлет-преобразования [10]. Этот метод позволяет определять временную последовательность максимумов вейвлет-коэффициентов синхросжатого вейвлетного преобразования сигнала и на их основании находить несколько гребней, соответствующих динамике фаз и частот. Метод синхросжатого вейвлет-преобразования нашел широкое применение при изучении реактивных паттернов электроэнцефалограмм, которые регистрируются как ответы головного мозга на периодические стимулы разных частот [11–14]. Различия в соотношениях частот и фаз двух сигналов, один из которых является периодическим стимулом, а второй – ответом мозга на это возбуждение, могут служить количественными характеристиками определенных состояний и трактоваться как характеристики нормального или патологического состояния. Различия в этих характеристиках, определенные для разных групп пациентов, могут служить объективными критериями патологических нарушений.

Целью данного исследования является демонстрация работы метода синхросжатого вейвлет-преобразования для сравнительного анализа синхронизации временных рядов, полученных из электроэнцефалограмм, зарегистрированных во время ритмической фотостимуляции при нормальной активности головного мозга и при деадаптационных расстройствах в форме различных фобий.

Материал и методы исследования

Проанализированы временные ряды, полученные на основании безартефактных сигналов ЭЭГ во время периодической фотостимуляции на частотах от 4 до 16 Гц для десяти здоровых испытуемых (группа 1) и девяти пациентов с деадаптационными расстройствами в форме различных фобий (группа 2). Данные предоставлены Институтом физиологии им. И. П. Павлова РАН. Частота дискретизации составляла 256 Гц.

Фотостимул $p(t)$ в интервале фотостимуляции аппроксимировался последовательностью гауссовых импульсов, следующих друг за другом с заданной частотой f_p .

Алгоритм расчета мгновенных фаз и частот на основе вейвлетного преобразования временного ряда [10] состоял из следующей последовательно-сти процедур.

1. Вычисление синхросжатого вейвлетного преобразования:

$$T_s(\omega_l, b) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{a_k} W_s(a_k, b) a^{-3/2} \Delta a_k,$$

$$a_k : |\omega(a_k, b) - \omega_l| \leq \Delta\omega / 2,$$

где

$$W_s(a, b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt;$$

$s(t)$ – анализируемый временной ряд; a и b – переменные масштаба и временного сдвига; $\psi((t-b)/a)$ – вейвлетная функция, полученная из материнского вейвлета $\psi(t)$ путем масштабирования и сдвига по времени, круговая частота определяется формулой:

$$\omega_l = (l/n)F_S, \quad l = 1, \dots, n, \quad \Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1} = F_S / n;$$

F_S – частота дискретизации временного ряда $s(t)$; n – число масштабов, используемых при построении вейвлетного спектра $W_s(a, b)$; $\omega_l - l^{\text{th}}$ – дискретная круговая частота; $a_k - k^{\text{th}}$ – дискретный масштаб и $\Delta a_k = a_k - a_{k-1}$.

2. Нахождение гребней (частотных компонент временного ряда) путем решения задачи условной оптимизации поиска среди всех кривых тех, которые максимизируют коэффициенты синхросжатого вейвлетного преобразования:

$$\omega_r(b) = \arg \max |T_s(\omega_l, b)|,$$

$$\omega_l \in [\omega_r(b) - \Delta\omega / 2, \omega_r(b) + \Delta\omega / 2].$$

3. Нахождение мгновенных фаз и частот на основании вычисленных гребней $\omega_r(b)$ в соответствии с формулами:

$$f_s(b) = \omega_r(b) / 2\pi, \quad f_s(b) = \arg |T_s(\omega_r(b), b)|.$$

Далее для двух временных рядов вычисляли соотношение мгновенных частот $f_s(b) / f_p(b)$ и разность мгновенных фаз:

$$\Delta\phi_{n,m}(b) = (n\phi_s(b) - m\phi_p(b)) / 2\pi,$$

где n и m – целые числа.

Фазовую синхронизацию порядка $n:m$ между двумя временными рядами определяли следующим условием:

$$|\Delta\phi_{n,m}(b) - c_1| < \varepsilon_1,$$

где c_1 и ε_1 – константы.

При синхронизации порядка $n:m$ величина отношения мгновенных частот изменялась вокруг постоянного значения $c_2 = m/n$, а длительность фазовой синхронизации $n:m$ определялась как интервал времени Δt_{syn} , в течение которого величина разности мгновенных фаз была близка к единице [15].

Результаты исследования и их обсуждение

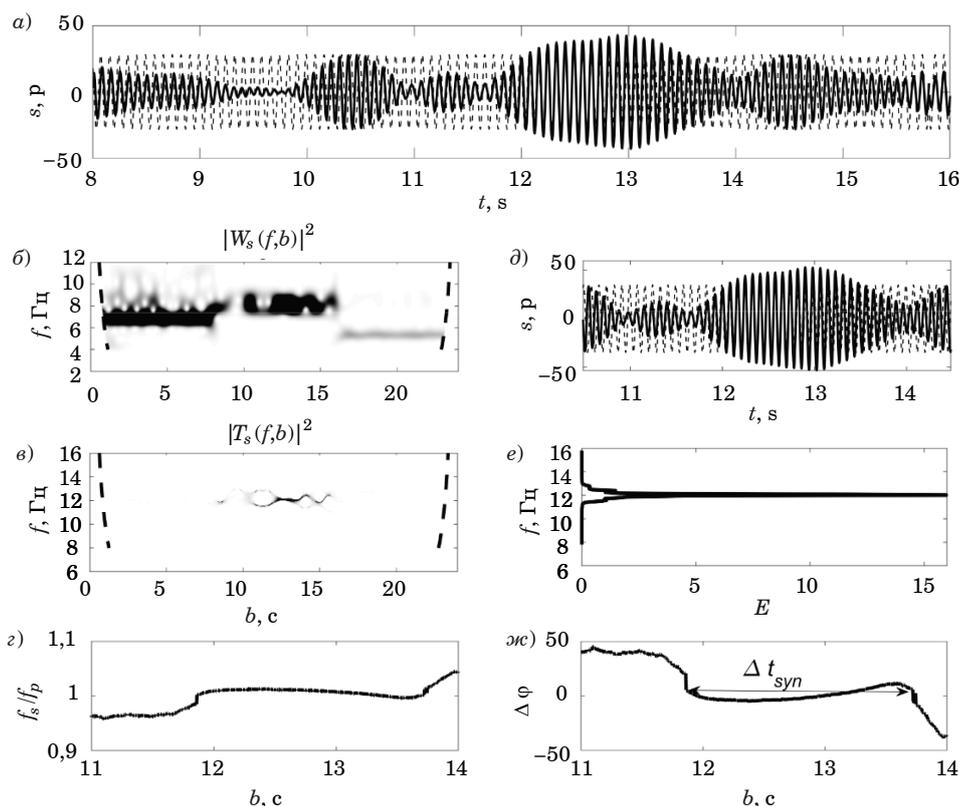
На рис. 1 показаны результаты анализа синхронизации между фотостимулом с частотой 12 Гц и ответом мозга здорового человека на это световое возбуждение. Стимуляционный сигнал и паттерн ЭЭГ изображены на рис. 1, *a* и *d* (штрихпунктирной и сплошной кривыми соответственно). Стимуляция начиналась на 8-й секунде и заканчивалась на 16-й секунде.

Вейвлетный спектр $|W_s(f, b)|^2$ выявляет в паттерне ЭЭГ полосу с частотой 11 Гц в интервале времени до начала стимуляции и полосу с частотой 12 Гц во время стимуляции (рис. 1, *b*). Синхросжатый вейвлетный спектр $|T_s(f, b)|^2$ выявляет гребень на частоте фотостимуляции 12 Гц во время стимуляции (рис. 1, *e*). Максимум 12 Гц этого гребня отражается в глобальном вейвлетном спектре $E(f)$, который представляет собой интегральное распределение синхросжатого вейвлетного спектра (рис. 1, *e*).

В интервале времени [11,8–13,7] с отношение мгновенных частот колеблется вокруг значения, близкого к единице (рис. 1, *z*), а мгновенная разность фаз – вокруг значения, близкого к нулю (рис. 1, *ж*). Длительность Δt_{syn} фазовой синхронизации в данном паттерне ЭЭГ составляет 1,9 с.

На рис. 2 продемонстрированы результаты анализа синхронизации между фотостимулом с частотой 12 Гц и ответом мозга человека с деадаптационными расстройствами на это световое возбуждение. Сигнал фотостимула и паттерн ЭЭГ изображены на рис. 2, *a*, *d* (штрихпунктирной и сплошной линиями соответственно). Стимуляция, как и в предыдущем примере, начиналась на 8-й секунде и заканчивалась на 16-й секунде.

В вейвлетном спектре $|W_s(f, b)|^2$ паттерна ЭЭГ обнаруживаются яркие полосы с максимальными частотами 5 и 6 Гц, при этом в интервале времени стимуляции определяется полоса с частотой 6 Гц (рис. 2, *b*). Гребень с этой частотой выявляет синхросжатый вейвлетный спектр $|T_s(f, b)|^2$



• Рис. 1. Пример наличия синхронизации порядка 1:1 между стимулом 12 Гц и ответом здорового мозга той же частоты. Стимул и паттерн ЭЭГ (а, д); проекция вейвлетного спектра на основе вейвлетного преобразования (б); на основе синхросжатого вейвлетного преобразования (в); отношение мгновенных частот (г); усредненное по времени распределение вейвлетного спектра по частотам (е); мгновенная разность фаз (ж)

• Fig. 1. An example of the presence of synchronization of the order of 1:1 between a 12 Hz stimulus and a healthy brain response of the same frequency. EEG stimulus and pattern (a, d); projection of the wavelet spectrum based on the wavelet transform (b); based on the synchro-compressed wavelet transform (v); ratio of instantaneous (g); time-averaged distribution of the wavelet spectrum over frequencies (e); instantaneous difference phases (ж)

(рис. 2, в). Интегральное распределение синхросжатого вейвлетного спектра содержит обе частоты – 5 и 6 Гц (рис. 2, е).

В интервале времени [8,5–15,0] с отношение мгновенных частот колеблется вокруг значения, близкого к 0,5 (рис. 2, г), а мгновенная разность фаз – вокруг значения, близкого к нулю (рис. 2, ж). Длительность Δt_{syn} фазовой синхронизации порядка 2:1 между стимулом и ответом в данном паттерне ЭЭГ составляет 6,5 с.

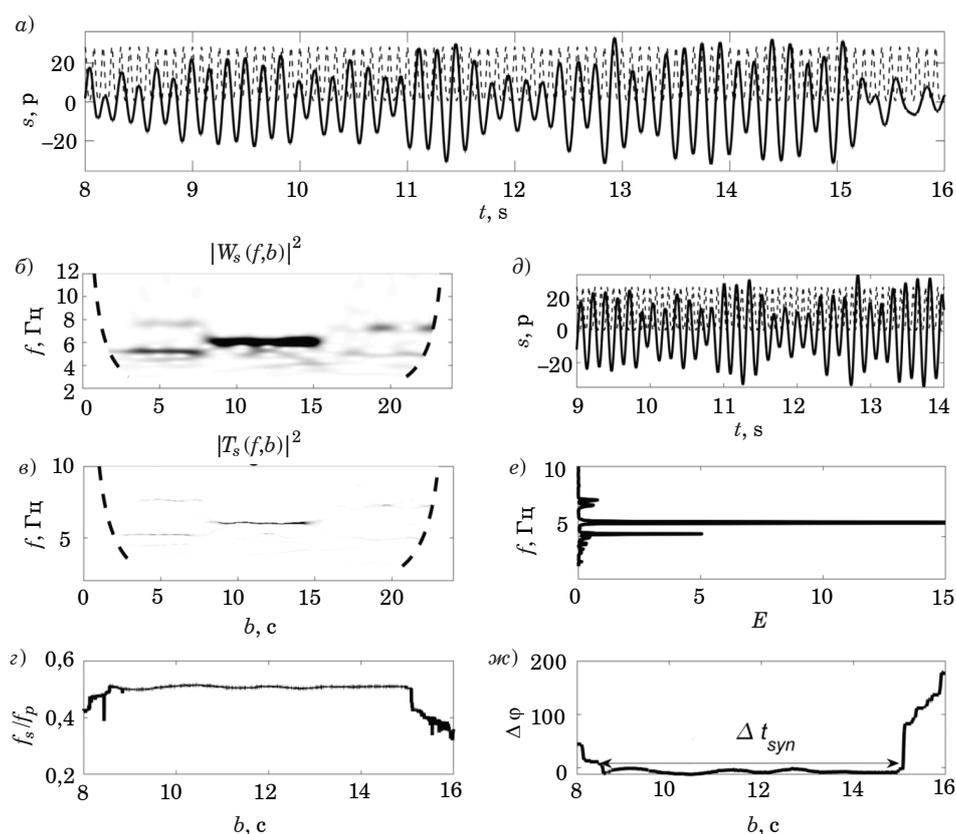
Порядки $n:m$ фазовой синхронизации порядка для группы 1 (здоровых испытуемых) и группы 2 (пациентов с дезадаптационными расстройствами) приведены в таблице.

Данные таблицы показывают, что в 100 % анализируемых паттернов здоровых лиц (группа 1) наблюдается фазовая синхронизация порядка 1:1 для периодических стимулов с частотами 10 и 12 Гц, а для остальных частот ритмическая стимуляция не приводит к возникновению синхронизации.

В отличие от этого, дезадаптационные расстройства (группа 2) в 81 % анализируемых паттернов приводили к возникновению различных порядков фазовой синхронизации: например, порядка 2:1 и 3:1 для частоты 12 Гц, порядка 1:1 для частот стимуляции 4 и 6 Гц и порядка 2:1 и 4:1 для частоты 16 Гц, а также порядка 4:1 и 5:1 для частоты 20 Гц (таблица).

Таким образом, в отличие от паттернов ЭЭГ здоровых испытуемых, в паттернах ЭЭГ лиц с дезадаптационными расстройствами обнаружены не только синхронизация порядка 1:1, при которой вызванный ответ имел ту же частоту, что и стимул, но и синхронизации порядков, при которых вызванный ответ имел частоту, кратно меньшую по сравнению с частотами ритмической стимуляции.

На рис. 3 показаны данные попарного сравнения длительностей фазовой синхронизации порядка 1:1 между группой 1 (здоровые лица) и группой 2 (с дезадаптационными нарушениями).



• *Рис. 2. Пример наличия синхронизации порядка 2:1 между стимулом 12 Гц и ответом головного мозга человека с дезадаптационными расстройствами (обозначения а-ж как на рис. 1)*
 • *Fig. 2. An example of the presence of synchronization of the order of 2:1 between a 12 Hz stimulus and the brain response of a person with maladjustment disorders (notations а-ж are the same as in fig. 1)*

- *Порядки n:m фазовой синхронизации порядка для разных групп*
- *Orders of n:m order phase synchronization for different groups*

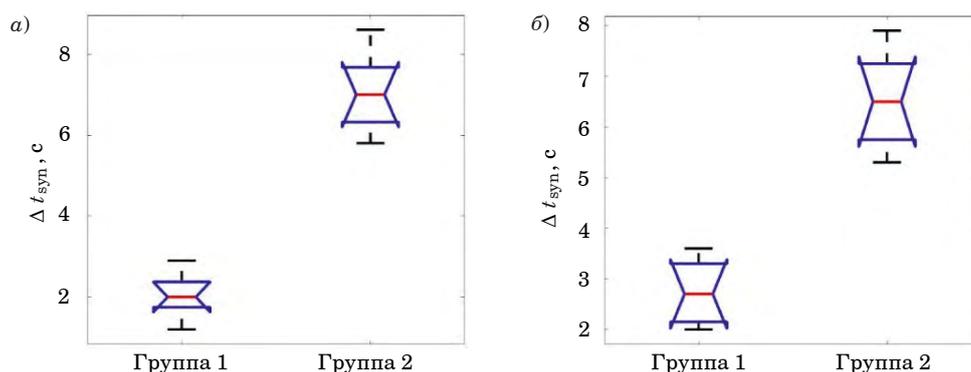
Стимул	Группа 1 (n=10)	Группа 2 (n=9)
f_P (Гц)	$n:m$	$n:m$
4	–	1:1
10	1:1	1:1
12	1:1	2:1; 3:1
16	–	2:1; 4:1
20	–	4:1; 5:1

Эти данные получены на основании однофакторного дисперсионного анализа.

Большие различия в центральных линиях (медианах выборочных значений Δt_{syn}), соответствующие большим значениям статистики Фишера F , свидетельствуют о значительных различиях в групповых средних. Групповые средние дли-

тельностью фазовой синхронизации порядка 1:1 различаются на уровне значимости $\alpha < 0,05$. При этом для обеих частот стимуляции длительность фазовой синхронизации порядка 1:1 в паттернах ЭЭГ пациентов из группы 1 меньше длительности синхронизации для пациентов из группы 2. Например, при фотостимуле с частотой 10 Гц величины $\Delta t_{syn} = (2,1 \pm 0,9)$ и $(7,1 \pm 1,2)$ с для групп 1 и 2 соответственно (рис. 3, а). Длительности фазовой синхронизации при стимуле с частотой 12 Гц для групп 1 и 2 равны $\Delta t_{syn} = (2,7 \pm 0,9)$ и $(6,5 \pm 1,1)$ с соответственно (рис. 3, б).

Таким образом, выявлено, что дезадаптационные расстройства связаны с большей длительностью фазовой синхронизации между стимулом и ответом головного мозга по сравнению с ответами здорового мозга на те же частоты возбуждения и при тех же порядках синхронизации. Поскольку степень синхронизации связана с длительностью фазовой синхронизации в том смысле, что чем больше длительность, тем выше степень синхронизации, степень фазовой синхронизации в паттернах группы 2 больше, чем в паттернах группы 1.



• Рис. 3. Сравнение длительностей фазовой синхронизации порядка 1:1 между группами 1 (а) и 2 (б) для частот возбуждения 10 и 12 Гц

• Fig. 3. Comparison of phase synchronization durations of the order of 1:1 between groups 1 (a) and 2 (b) for excitation frequencies of 10 and 12 Hz

Заключение

С помощью метода синхросжатого вейвлетного анализа выявлены различия в степени и порядках фазовой синхронизации ответов головного мозга на ритмический фотостимул здоровых

лиц и лиц с дезадаптационными расстройствами. Метод синхросжатого вейвлет-анализа заслуживает внимания для использования в анализе и фильтрации ЭЭГ, а следовательно, может существенно помочь в медицинской диагностике различных нарушений в работе головного мозга.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ivanov P. C., Rosenblum M. G., Peng C. K. et al. Scaling behaviour of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis // Nature. 1996. № 38. P. 323–328.
2. Bozhokin S. V., Suvorov N. B. Wavelet analysis of transient processes in EEG photic // Biomed. electron. 2008. № 3. P. 13–19.
3. Borodina U. V., Aliev R. R. Wavelet spectra of visual evoked potentials; time course of delta, theta, alpha and beta bands // Neurocomputing. 2013. № 121. P. 551–555.
4. Wavelets in neuroscience / A. E. Hramov [et al.] // Springer Series in Synergetics. Berlin: Springer, 2015. 314 p.
5. Pikovsky A. S., Rosenblum M. G., Kurths J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 102 p.
6. The synchronization of chaotic systems / S. Boccaletti [et al.] // Physics reports. 2002. № 366. P. 1–101.
7. Detection of synchronization from univariate data using wavelet transform / A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, V. I. Ponomarenko, M. D. Prokhorov // Physical review E. 2007. Vol. 75, № 5. P. 1–10.
8. Оценка степени синхронности режима перемежающейся фазовой синхронизации по временному ряду (модельные системы и нейрофизиологические данные) / О. И. Москаленко, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, М. О. Журавлев // Письма в Журнал эксперимент. и теорет. физики. 2016. № 103. С. 606–610.
9. Daubechies I., Lu J., Wu H. T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool // Appl. comput. harmon. anal. 2011. № 30. P. 243–261.
10. Dick O. E. Wavelet and recurrence analysis of EEG patterns of subjects with panic attacks // Studies in computational intelligence. 2020. № 856. P. 172.
11. Dick O. E., Glazov A. L. Estimation of the synchronization between intermittent photic stimulation and brain response in hypertension disease by the recurrence and synchrosqueezed wavelet transform // Neurocomputing. 2021. № 455. P. 163–177.
12. Dick O. E., Glazov A. L. Application of joint recurrence analysis for estimating phase synchronization of physiological signals // Technical physics. 2022. № 67. P. 48–60.
13. Dick O. E. Search for markers of moderate cognitive disorders through phase synchronization between rhythmic photostimulus and EEG pattern // Advances in neural computation, machine learning, and cognitive research. Studies in computational intelligence. 2023. № 1064. P. 191–199.
14. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients / F. Mormann, F. Lehnertz, P. David, C. E. Elger. Physica D: Nonlinear phenomena. 2000. Vol. 144, № 3-4. P. 358–369.

REFERENCES

1. Ivanov P. C., Rosenblum M. G., Peng C. K. et al. Scaling behaviour of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis. *Nature*. 1996;(38):323–328.
2. Bozhokin S. V., Suvorov N. B. Wavelet analysis of transient processes in EEG photic. *Biomed. electron*. 2008;(3):13–19.
3. Borodina U. V., Aliev R. R. Wavelet spectra of visual evoked potentials; time course of delta, theta, alpha and beta bands. *Neurocomputing*. 2013;(121):551–555.
4. Hramov A. E., Koronovsky A. A., Makarov V. A., Pavlov A. N., Sitnikova E. *Wavelets in neuroscience*. Springer Series in Synergetics. Berlin: Springer; 2015. 314 p.
5. Pikovsky A. S., Rosenblum M. G., Kurths J. *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. 102 p.
6. Boccaletti S., Kurths J., Osipov G. V., Valladares D., Zhou C. The synchronization of chaotic systems. *Physics reports*. 2002;(366):1–101.
7. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D. Detection of synchronization from univariate data using wavelet transform. *Physical review E*. 2007;75(5):1–10.
8. Moskalenko O. I., Koronovskii A. A., Khramov A. E., Zhuravlev M. O. Estimation of the degree of synchronism of the intermittent phase synchronization mode by the time series (model systems and neurophysiological data). *Letters to the Journal of experimental and theoretical physics*. 2016;(103):606–610. (In Russ.).
9. Daubechies I., Lu J., Wu H. T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool. *Appl. comput. harmon. anal.* 2011;(30):243–261.
10. Dick O. E. Wavelet and recurrence analysis of EEG patterns of subjects with panic attacks. *Studies in computational intelligence*. 2020;(856):172.
11. Dick O. E., Glazov A. L. Estimation of the synchronization between intermittent photic stimulation and brain response in hypertension disease by the recurrence and synchrosqueezed wavelet transform. *Neurocomputing*. 2021;(455):163–177.
12. Dick O. E., Glazov A. L. Application of joint recurrence analysis for estimating phase synchronization of physiological signals. *Technical physics*. 2022;(67):48–60.
13. Dick O. E. Search for markers of moderate cognitive disorders through phase synchronization between rhythmic photostimulus and EEG pattern. *Advances in neural computation, machine learning, and cognitive research*. *Studies in computational intelligence*. 2023;(1064):191–199.
14. Mormann F., Lehnertz F., David P., Elger C. E. Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients. *Physica D: Nonlinear phenomena*. 2000;144(3-4):358–369.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Смирнов Александр Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – нелинейные динамические системы.

Дик Ольга Евгеньевна, доктор биологических наук, доцент кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – использование методов нелинейной динамики для обработки сигналов.

Фролова Елена Александровна, доктор технических наук, доцент, директор института фундаментальной подготовки и технологических инноваций Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – методы управления качеством сложных технических систем.

Smirnov Alexander O., D. Sc. in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interest – nonlinear dynamical systems.

Dick Olga E., D. Sc. in Biol. Sciences, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the use of nonlinear dynamics methods for signal processing.

Frolova Elena A., D. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Director at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – methods of quality management of complex technical systems.

Титов Вадим Евгеньевич, аспирант кафедры высшей математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – использование методов нелинейной динамики для обработки сигналов.

Поступила в редакцию 16.04.2023

Поступила после рецензирования 20.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Titov Vadim E., Postgraduate Student at the Department of Higher Mathematics and Mechanics, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the use of nonlinear dynamics methods for signal processing.

Received 16.04.2023

Revised 20.04.2023

Accepted 28.04.2023

Научная статья

УДК 504.058/528.854/614.842.3

DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-76-83

Видимость малых возгораний сквозь кроны деревьев: некоторые результаты натурных исследований на территории Ленинградской области

Игорь Владимирович Мателенок¹

✉ igor_matelenok@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2303-206X

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены вопросы мониторинга малых возгораний в лесах с воздуха. Для получения оценок видимости очагов горения сквозь кроны деревьев выполнен комплекс полевых и камеральных работ, в том числе осуществлено моделирование геометрии визирования, поставлены натурные эксперименты на тестовом участке на территории Ленинградской области, проведен анализ собранных разнородных данных. Составлены рекомендации для реализации мониторинга возгораний в лесах.

Ключевые слова: видимость пламени, детектирование пламени, дистанционный мониторинг, кроны деревьев, лесной полог, лесные пожары

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (проект МК-1004.2020.5). Также автор выражает благодарность магистрантам Е. А. Евдокимовой и Ф. А. Алексееву за помощь в организации полевых работ.

Для цитирования: Мателенок И. В. Видимость малых возгораний сквозь кроны деревьев: некоторые результаты натурных исследований на территории Ленинградской области // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 76–83. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-76-83.

Original article

Visibility of small fires through tree crowns: some results of field studies in the Leningrad region

Igor V. Matelenok¹

✉ igor_matelenok@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2303-206X

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The issues of air-based monitoring of small-size fires in forests are considered. To estimate the visibility of fires through tree crowns, a complex of field and office work was carried out, including modeling of the sensing geometry, field experiments on a test site in the Leningrad region, an analysis of the collected heterogeneous data. Recommendations for the implementation of forest fires monitoring were made.

Keywords: flame detection, flame visibility, forest canopy, forest fires, remote sensing, tree crowns

Acknowledgements. This work was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation for State support of young russian scientists and State support for leading scientific schools of the Russian Federation (project MK-1004.2020.5). The author is additionally thankful to master students E. A. Evdokimova and F. A. Alekseev for assisting in the field work.

For citation: Matelenok I. V. Visibility of small fires through tree crowns: some results of field studies in the Leningrad region. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):76–83. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-76-83.

Введение

Проблеме дистанционного обнаружения процессов горения, инициированных под пологом леса, в настоящее время уделяется пристальное внимание. Это связано с важностью раннего выявления возгораний для своевременного принятия мер по прекращению горения и минимизации ущерба для окружающей среды и рукотворных объектов. Современная инфраструктура мониторинга возго-

раний в лесных массивах основана на аппаратуре контроля, размещаемой на наземных, авиационных и космических платформах. Ограничения по пространственному разрешению и цикличности съемки не позволяют задействовать спутниковые датчики для решения задач раннего обнаружения очагов горения. Аппаратура наземного базирования для детектирования пламени и дыма в настоящее время является основным инструментом мониторинга малых возгораний во многих регионах

[1, 2], хотя также не лишена недостатков. Основным направлением использования камер видимого и инфракрасного диапазона, размещаемых на борту беспилотных летательных аппаратов, является контроль уже обнаруженных очагов горения [3]. Применение таких средств для детектирования новых малых возгораний ограничено недостаточной развитостью моделей видимости пламени, которые могут служить основой выбора геометрии визирования, и сложностью алгоритмов автоматического обнаружения в условиях маршрутной съемки (прежде всего, из-за необходимости учета различных видов движения объектов в кадре) [4, 5]. До последнего времени отсутствовал опыт проведения работ по анализу видимости очагов горения на территории Северо-Западного региона Российской Федерации. Настоящая работа направлена на восполнение недостатка данных о видимости пламени через полог леса в естественных условиях.

Целью исследования является получение априорной информации о видимости очагов горения при их визировании сквозь кроны деревьев, необходимой для выбора режимов и схем дистанционного зондирования с малых высот. В рамках работы решаются задачи анализа различных вариантов расположения очага горения относительно объектов лесных насаждений, типизации геометрии визирования при мониторинге возгораний с малых высот, планирования, организации и проведения натурных экспериментов по анализу видимости расположенного на земле пламени через кроны деревьев выбранных видов, обработки и интерпретации собранных данных для составления рекомендаций по реализации мониторинга малых возгораний с воздуха.

Материал и методы исследования

Для анализа вариантов взаимного расположения очага горения, деревьев и съемочной аппаратуры выполнено пространственное моделирование сцен. На основе данных о геометрических параметрах крон древостоев и описаний их структуры, полученных из открытых источников [6, 7], с помощью написанного в рамках работы программного кода на языке программирования R [8] генерировались трехмерные модели деревьев. Далее на их базе готовились сцены, позволяющие получить различную пространственную организацию кадра. После указанных подготовительных работ проводилось рассмотрение этих сцен с наложением лучей, задающих направление взгляда наблюдателя/камеры, и выделением типичных схем визирования.

Среди схем визирования рассматривались варианты с различной длиной пути излучения внутри кроны и разной оптической толщиной и из них выбирались те, которые предоставляют наиболее широкие возможности для решения задачи детектирования пламени. Далее они исследовались в рамках натурных экспериментов в полевых условиях. В качестве испытательного полигона выбран участок в границах Сосновского сельского поселения Приозерского района Ленинградской области, занятый смешанным лесом. Выбор данного участка обусловлен наличием большого количества пород деревьев и разнообразием почвенного покрова в его границах, что позволяет рассматривать различные сочетания исследуемых объектов, а также возможностью круглогодичного подъезда к участку для проведения работ.

Эксперименты на участке проводились в полевые сезоны 2020–2022 гг. и предусматривали использование различных методов и инструментов. В рамках настоящей работы рассматривается этап, на котором выполнялось исследование видимости пламени на основе фотофиксации сцены с наземной платформы.

Эксперименты проводились в сухую погоду при переменной облачности, чтобы охватить различные условия освещения объектов сцены. В каждую фотографируемую сцену входили следующие объекты: очаг горения, крона дерева, через которую он просматривался, поверхность земли, являющаяся фоном. В отдельные сцены были включены искусственные объекты, играющие роль «ложных целей». Пламенное горение древесного топлива было инициировано на передвижном очаге, положение которого менялось между экспериментами. Размер пламени поддерживался относительно постоянным (максимальное изменение линейного размера оставалось в пределах 10 см), температура очага контролировалась с помощью пирометра СЕМ DT-8867H и удерживалась в диапазоне 735–820 °С (с понижениями в периоды добавления новых порций топлива, когда съемка приостанавливалась). Фотофиксация пламени через крону осуществлялась зеркальной фотокамерой Nikon D3200 с зум-объективом. Для обеспечения возможности задания необходимой геометрии визирования камера была установлена на телескопическую вышку Socage на базе автомобиля «Камаз». Для измерения расстояний применен лазерный дальномер Bosch GLM 80 professional.

Полученные фотоизображения обрабатывались с помощью программного обеспечения ImageJ (дистрибутив Fiji) [9], а также кода, написанного на языке R. Осуществлялась выборочная

коррекция экспозиции и цветовой температуры, в ходе которой снимки приводились к экспозиционному числу 16,9 и цветовой температуре 4896 К. На следующем этапе работы выполнялась пороговая сегментация объектов в поле изображения с выделением в пространстве «тон – насыщенность – яркость» областей, соответствующих пламени, и определением их статистических характеристик. При этом рассматривались не только образы очага пламенного горения, но и образы «ложных целей» – объектов, по своим цветоярким характеристикам близких к пламени. По результатам анализа делались выводы относительно видимости пламени и возможности его дифференциации с окружающими объектами в заданных условиях.

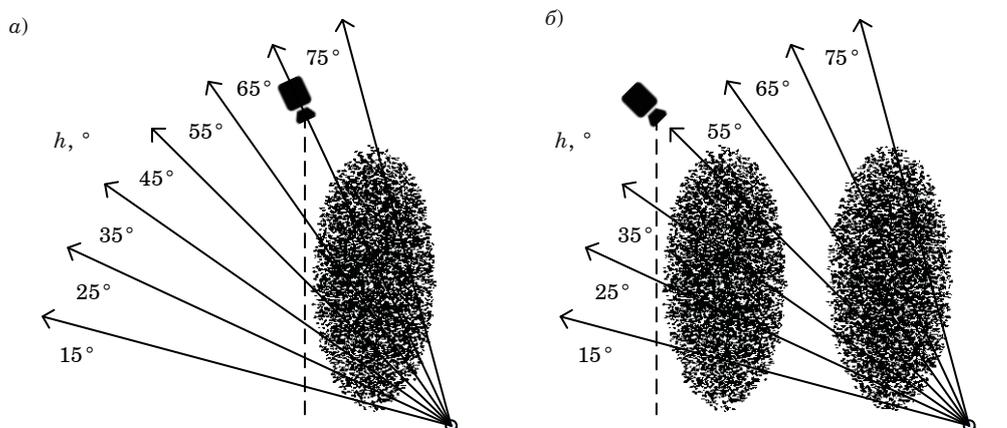
Результаты исследования и их обсуждение

С применением указанных выше методов были проведены теоретические и экспериментальные изыскания, в ходе которых получен массив данных о видимости очага горения для разных схем зондирования с воздуха. Ниже рассматривается случай оценки видимости сквозь кроны одной из наиболее распространенных на территории северо-запада европейской части Российской Федерации лиственных пород деревьев – березы.

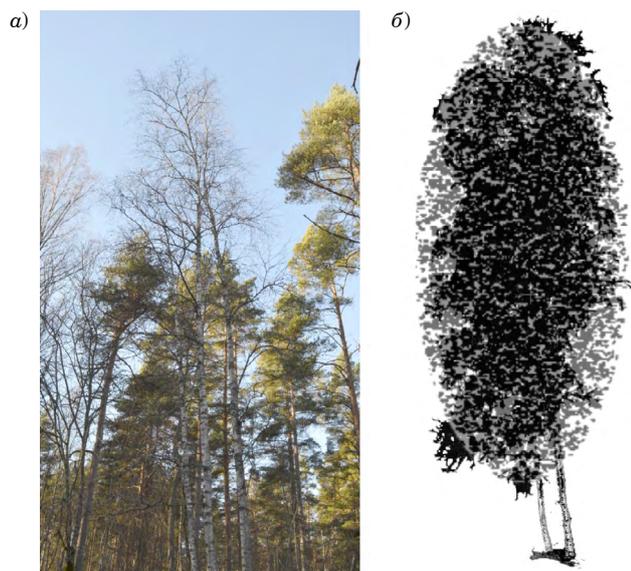
На рис. 1 показаны типичные геометрии визирования при разном относительном положении объектов в сцене, полученные в ходе пространственного моделирования. Очаг горения моделируется в сцене сферическим изотропным источником, излучение видимого диапазона от которого фиксируется камерой, находящейся в определен-

ной позиции. Модель кроны, сгенерированная по данным [6, 7], экранирует излучение, затрудняя детектирование пламени с воздуха. На изображении показаны лучи, задающие направление визирования очага и продолжающие главную оптическую ось объектива. В общем случае для конкретного смещения очага относительно кроны может быть подобрана высота, при нахождении камеры на которой будет достигаться максимальная видимость пламени. Для указанной породы деревьев выделяется диапазон угловых высот 20–50°, которому при рассмотрении единичной кроны соответствует наименьшее ослабление излучения за счет сочетания длины пути излучения и преимущественной ориентации фитоэлементов (согласно данным [4]). Но для системы рядом расположенных крон суммарный путь излучения в пологе на таких углах значительно удлиняется и не компенсируется ориентацией листовых пластинок, диапазон же 50–90° не затрагивается влиянием эффекта группирования крон. При этом в реальных условиях мониторинг возгораний с воздуха предусматривает галсирование летательного аппарата с непрерывной видеофиксацией обстановки. В таких условиях оптимальной является схема наклонного зондирования, позволяющая выдерживать большую скорость движения авиоплатформы, по сравнению с зондированием в надири, и дающая геометрическое преимущество в детектировании очагов при малой сомкнутости полога. Таким образом, наибольший интерес представляет видимость пламени со средних угловых высот (от 35 до 50°). В связи с этим было принято решение сделать акцент в экспериментах прежде всего на этот диапазон.

На рис. 2, а показано обзорное фото группы берез в период зимнего покоя, кроны которых в лет-



• Рис. 1. Схемы визирования пламени при разном его расположении относительно кроны: а – одиночной кроны; б – системы крон; h – угловая высота, °
 • Fig. 1. Schemes of fire viewing geometry for different flame location relative to the crown: а – individual crown case; б – crown system case; h – angular height, °



• Рис. 2. Пример исследуемого объекта: а – обзорное фото группы берез, задействованных в экспериментах по оценке видимости пламени; б – силуэт группы берез с наложенным на него модельным представлением кроны, использованным при анализе типичных вариантов геометрии визирования

• Fig. 2. Example of the object under investigation: a – overview photo of the birch tree group involved in flame visibility experiments; b – silhouette of the birch tree group with superimposed model representation of the crown used to analyze typical viewing geometry patterns

нее время были задействованы в экспериментах. Система соприкасающихся крон в рассматриваемом случае имеет эллипсоидную форму, что видно из наложения на силуэт этой системы модельного образа кроны, использованного на этапе анализа вариантов взаимного расположения очага горения, деревьев и съемочной аппаратуры (рис. 2, б).

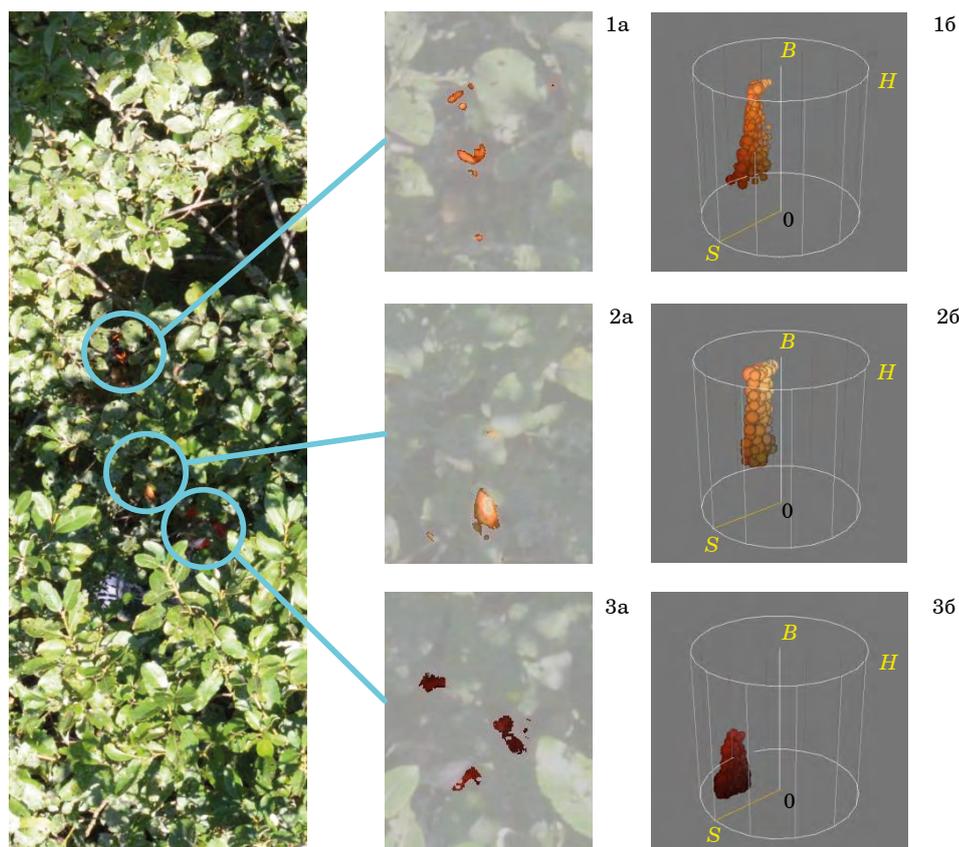
В ходе экспериментов по оценке видимости пламени, общая схема которых описана выше, для сцен, в которых излучение очага экранировалось кронами взрослых берез (листовой индекс от 4 и выше), было выяснено, что по достижении камерой высоты 15 м (и угловой высоты 46°) пламя становится неразличимым при использовании среднефокусной оптики из-за большого количества фитоэлементов на пути излучения от очага к камере. При меньшей угловой высоте отдельные фрагменты пламени визуально обнаруживаются и опознаются, но автоматическая их идентификация при наличии в кадре объектов со схожими цветоваяростными характеристиками может представлять трудности. Так, в качестве примера на рис. 3 показано фотоизображение, на котором запечатлены не только части очага горения, но и «ложные цели». И если окрашенный в оранжевый цвет упаковочный материал, расположенный под пологом, смещен в цветовом пространстве «отте-

нок – насыщенность – яркость» относительно пламени существенно и может быть отделен от него простыми методами классификации (K -среднего и т. п.), то освещенные солнцем ярко окрашенные листовые пластинки по цветоваяростным характеристикам и их пространственному распределению в плоскости кадра могут быть весьма близки к фрагментированному образу пламени, как видно из рис. 3. Соответственно, в определенных условиях зондирования необходимость идентификации будет задавать более жесткие требования к образу пламени и, прежде всего, детальности изображения видимых фрагментов, чем задача различения аномалии (яркостного или цветового контраста), соответствующая определению видимости.

На рис. 4, а показаны интервалы яркости, насыщенности и цветового тона, в которые попадают пиксели образа пламени на фотоизображениях, сделанных с разных угловых высот. Наличие зависимости насыщенности и цветового тона от возвышения камеры над поверхностью земли не может быть подтверждено на основе собранных данных, однако наблюдается слабо выраженная тенденция к уменьшению яркости пикселей пламени с увеличением угловой высоты сенсора. Можно предположить, что это связано с особенностями процедуры формирования цифрового изображения: граничные пиксели каждого фрагмента пламени из-за эффекта усреднения приобретают более низкую яркость, чем приближенные к его центру, что дает для меньших по площади и более фрагментированных образов пламени (снимков с больших высот) в среднем меньшие значения яркости.

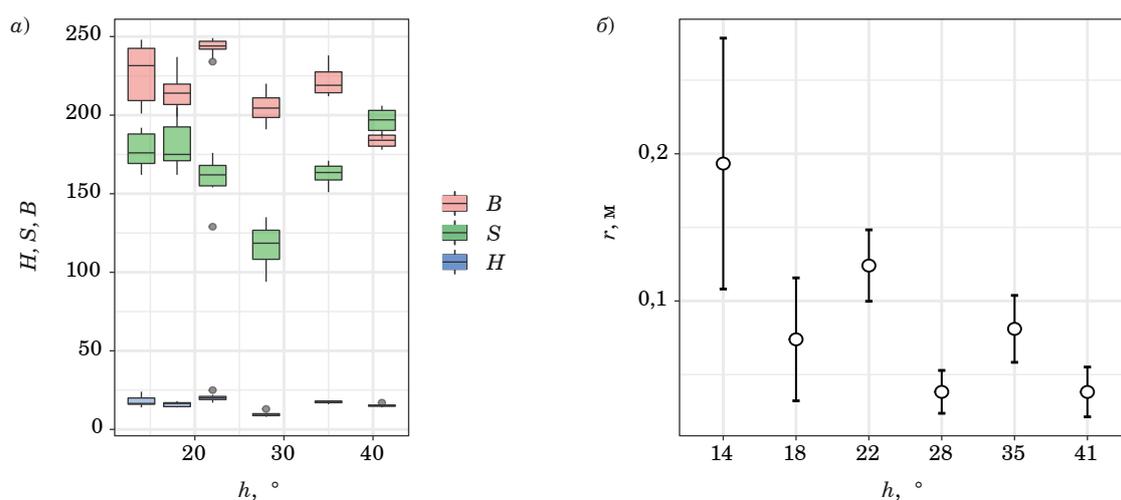
В ходе анализа экспериментальных данных было установлено, что пламя диаметром 50 см может быть визуально обнаружено по данным съемки через неразрезанные кроны взрослых берез с высоты до 14 м. Этой высотной отметке в экспериментах в зависимости от планового положения очага относительно кроны соответствовала угловая высота от 40 до 65° .

Представляет существенный интерес изменение эквивалентного размера r видимых фрагментов пламени в зависимости от высоты зондирования h . Этот размер определяется как диаметр объекта, равного по площади сумме площадей видимых фрагментов пламени, взвешенной по расстоянию от камеры до очага горения. Пример зависимости такого рода показан на рис. 4, б. Было обнаружено, что при наличии значительного разброса значений r наблюдается его уменьшение с высотой для случая зондирования через крону березы, что согласуется с ранее полученными результатами моделирования видимости



• *Рис. 3. Пример попадания в сделанный с высоты 14 м кадр фрагмента детектируемого пламени (1) и «ложных целей» – освещенной солнечным светом желто-оранжевой листовой пластинки (2) и оранжевого упаковочного материала (3); а – увеличенные участки сегментированного изображения; б – визуализация положения соответствующих объектов пикселей изображения в пространстве «оттенков (H) – насыщенность (S) – яркость (B)»*

• *Fig. 3. Example of detected flame fragments and false targets entered a frame taken from a height of 14 m: 1 – flame; 2 – yellow-orange leaf illuminated by sunlight; 3 – orange packing; а – zoomed in areas of the segmented image; б – visualization of the position of the image pixels corresponding to objects in “hue (H) – saturation (S) – brightness (B)” colorspace*



• *Рис. 4. Результаты анализа образов пламени на фотоснимках, сделанных через кроны берез с разных угловых высот h: а – представление пламени в пространстве «тон (H) – насыщенность (S) – яркость (B)»; б – изменчивость эквивалентного размера r видимых фрагментов пламени*

• *Fig. 4. The results of the analysis of flame representations in photos taken through the birch crowns from different angular heights h: а – flame image in “hue (H) – saturation (S) – brightness (B)” colorspace; б – variability of equivalent size r of visible flame fragments*

сти с использованием метода фотонных карт [4]. Большую дисперсию в выборках r , полученных для малых угловых высот, можно объяснить условиями эксперимента, в которых на таких высотах оказалось усилено влияние на видимость пламени отдельных листовых пластинок. Поскольку при изменении высоты закрепленной на автовышке камеры в ходе экспериментов ее плановые координаты не менялись (рис. 1), на малых h большая доля листовых пластинок оказывалась ближе к камере. Следовательно, средняя площадь проекций отдельных листьев в поле изображения оказывалась больше, что и обеспечило более выраженные колебания пропускания излучения очага горения от кадра к кадру. Однако стоит принять во внимание, что форма зависимости r от h меняется в зависимости от породы, составляющей полог, что, например, ранее было подтверждено результатами обработки данных экспериментов с кронами рябины.

Если опираться на данные о высотах деревьев в березовых древостоях [10], можно заключить, что максимальная зафиксированная высота деревьев на большинстве участков (пробных площадей) превосходит высоту, с которой обнаруживается пламя при визировании через крону. Это может создать сложности для реализации отдельных схем контроля возгораний: при использовании авиаплатформ самолетного типа, наиболее эффективных для покрытия съемкой больших территорий, выбранная с точки зрения безопасности минимальная высота полета не позволит обнаружить очаг горения малого размера (например, костер) непосредственно через кроны, в случае же применения мультироторных платформ при сохранении необходимой для обнаружения высоты потребуется существенное усложнение маршрута.

Необходимо принять во внимание, что пространственное разрешение данных с видеокamer, используемых в качестве аппаратуры зондирования при оперативном мониторинге возгораний, будет меньше, чем разрешение снимков с фотокамеры, задействованной в экспериментах. С другой стороны, видеоряд предоставляет более широкие возможности для выделения малых фрагментов пламени за счет добавления дополнительной оси координат в пространство признаков и уменьшения дискретности контроля по времени. Последнее позволяет задействовать весь обеспечиваемый камерой внутрикадровый диапазон углов визирования при движении авиаплатформ

мы над очагом горения и увеличить вероятность обнаружения пламени через пространство между кронами. Данное преимущество дополнительно может быть усилено при использовании камер с широкоугольными объективами.

Заключение

В рамках исследования выполнен комплекс работ, направленных на получение априорной информации о видимости очагов горения при их визировании сквозь кроны деревьев. По результатам проведенного анализа вариантов расположения очага горения относительно крон одиночных деревьев и систем крон для типичных геометрий визирования диапазон угловых высот от 35° до 50° выбран для углубленного изучения в натуральных экспериментах. В ходе экспериментов, проводившихся на тестовом участке на территории Приозерского района Ленинградской области, была выполнена фотофиксация искусственно инициированного пламени через кроны с разных высот. В результате камеральной обработки полученных изображений и дополнительной информации были составлены параметрические описания образов пламени и «ложных целей», определены усредненные значения цветоярких характеристик и размеров видимых фрагментов пламени для разных геометрий визирования. Составленные описания выражают как свойства структурных элементов полога леса, так и особенности используемого для фотофиксации оборудования и применяемых вариантов геометрии визирования. Было выявлено, что фрагменты пламени имеют компактное представление в пространстве «тон – насыщенность – яркость», что позволяет отделять пламя от фона в периоды года, когда отсутствуют «ложные цели», такие как яркоокрашенные листовые пластинки, антропогенные объекты красного и оранжевого цветов. Сделан вывод, что высоту, необходимую для обнаружения очага горения малого размера с воздуха при визировании сквозь крону, в условиях реальных лесных массивов использовать проблематично, и во многих случаях пламя будет видимым лишь через области локального разрежения полога. Полученные данные далее могут быть использованы для принятия решений о выборе режимов съемки и геометрии визирования при мониторинге возгораний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение систем распределенного дистанционного мониторинга в лесном секторе / Я. А. Петров [и др.] // Цифровые технологии в лесном секторе: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. (СПб., 26–27 марта 2020 г.). СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 116–119.
2. Система дистанционного мониторинга и управления «ЛЕСОХРАНИТЕЛЬ». URL: <https://lesokhranitel.ru> (дата обращения: 10.04.2023).
3. Yuan C., Liu Z., Zhang Y. Aerial images-based forest fire detection for firefighting using optical remote sensing techniques and unmanned aerial vehicles // J. intell. robot. syst. 2017. Vol. 88, № 2–4. P. 635–654.
4. Matelenok I. V., Alekseev F. A., Evdokimova E. A. Influence of the canopy structure of a birch forest on the visibility of the fires below // IOP conference series: Earth and environmental science. IOP Publishing, 2021. Vol. 677, № 5. P. 052122. Doi: 10.1088/1755-1315/677/5/052122.
5. Мателенок И. В. Особенности обнаружения пламени на видео при поиске очагов горения в лесах с авиаплатформ // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXIII Междунар. науч. конф. (СПб., 1–5 июня 2020 г.): в 2 ч. Ч. 2. СПб.: ГУАП, 2020. С. 125–133.
6. Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species? / J. Pisek, O. Sonnentag, A. D. Richardson, M. Möttus // Agricultural and forest meteorology. 2013. Vol. 169. P. 186–194. Doi: 10.1088/1755-1315/677/5/052122.
7. Wang T., Tigerstedt P. M. A., Viherä-Aarnio A. Photosynthesis and canopy characteristics in genetically defined families of silver birch (*Betula pendula*) // Tree physiology. 1995. Vol. 15, № 10. P. 665–671. Doi: 10.1093/treephys/15.10.665.
8. R Core Team 2020. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R foundation for statistical computing. URL: <https://www.R-project.org> (дата обращения: 10.04.2023).
9. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis / J. Schindelin [et al.] // Nature methods. 2012. № 9. P. 676–682. Doi:10.1038/nmeth.2019.
10. Лебедев А. В., Кузьмичев В. В. Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Известия Санкт-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 100–113. Doi: 10.21266/2079-4304.2020.230.100-113.

REFERENCES

1. Petrov Ya. A., Stepanov S. Yu., Sidorenko A. Yu., Parshukov F. A. Primenenie system raspredelennogo distantsionnogo monitoringa v lesnom sektore. Tsifrovye tekhnologii v lesnom sektore: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference. SPb., 26–27 March 2020. SPb.: Politeh-Press; 2020, pp. 116–119. (In Russ.).
2. Remote sensing and control system “LESOKHRANITEL”. Available from: <https://lesokhranitel.ru> [Accessed 10 April 2023].
3. Yuan C., Liu Z., Zhang Y. Aerial images-based forest fire detection for firefighting using optical remote sensing techniques and unmanned aerial vehicles. J. intell. robot. syst. 2017;88(2–4):635–654. Doi: 10.1007/s10846-016-0464-7.
4. Matelenok I. V., Alekseev F. A., Evdokimova E. A. Influence of the canopy structure of a birch forest on the visibility of the fires below. IOP conference series: Earth and environmental science. IOP Publishing; 2021;677(5):052122. Doi: 10.1088/1755-1315/677/5/052122.
5. Matelenok I. V. Aspects of flame detection in videos caught by aircraft cameras to search for forest fires. Wave electronics and infocommunication systems: Proceedings of the XXIII International conference. SPb., 1–5 June 2020. SPb.: SUAI; 2020, pp. 125–133. (In Russ.).
6. Pisek J., Sonnentag O., Richardson A. D., Möttus M. Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species?. Agricultural and forest meteorology. 2013;169:186–194. Doi: 10.1016/j.agrformet.2012.10.011.
7. Wang T., Tigerstedt P. M. A., Viherä-Aarnio A. Photosynthesis and canopy characteristics in genetically defined families of silver birch (*Betula pendula*). Tree physiology. 1995;15(10):665–671. Doi: 10.1093/treephys/15.10.665.
8. R Core Team 2020. R: a language and environment for statistical computing vienna: R foundation for statistical computing. Available from: <https://www.R-project.org> [Accessed 10 April 2023].
9. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. Nature methods. 2012;(9):676–682. Doi:10.1038/nmeth.2019.
10. Lebedev A. V., Kuzmichev V. V. Verification of bi-parameter models of dependence diameter on breast height in birch stands. Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2020;(230):100–113. (In Russ.). Doi: 10.21266/2079-4304.2020.230.100-113.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Мателенок Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – дистанционное зондирование в микроволновом диапазоне, компьютерное зрение, структура растительного покрова, тундровые экосистемы.

Поступила в редакцию 17.04.2023

Поступила после рецензирования 20.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Matelenok Igor V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – microwave remote sensing, computer vision, vegetation cover structure, tundra ecosystems.

Received 17.04.2023

Revised 20.04.2023

Accepted 28.04.2023

Особенности унификации количества нормативно-технической документации в структурном подразделении на основании принципов функциональной ценности

Антон Александрович Шашмури¹

✉ shashmurin.anton@gmail.com, orcid.org/0009-0003-2599-6393

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Описаны проблематика документооборота в современной организации и способы анализа текущей документации с целью перевода в цифровую форму, что позволит сократить трудозатраты и повысить производительность труда персонала организации.

Ключевые слова: документооборот, структурирование функции качества, цифровизация

Для цитирования: Шашмури А. А. Особенности унификации количества нормативно-технической документации в структурном подразделении на основании принципов функциональной ценности // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 84–87. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-84-87.

Original article

Features of unification of the quality of normative and technical documentation in a structural division on the basis of the principles of functional value

Anton A. Shashmurin¹

✉ shashmurin.anton@gmail.com, orcid.org/0009-0003-2599-6393

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article describes the problems of the workflow of a modern organization and ways to analyze the existing documentation in order to convert it into digital form, which reduces labor costs and increases the productivity of the organization's personnel.

Keywords: workflow, structuring the quality function, digitalization

For citation: Shashmurin A. A. Features of unification of the quality of normative and technical documentation in a structural division on the basis of the principles of functional value. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):84–87. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-84-87.

Введение

В настоящее время существует достаточно распространенная проблема, связанная с огромным количеством документации, представленной на бумажных носителях, требуемой по условиям контрактов или общей рыночной средой. В подобных случаях создаются отделы, которые реализуют социализированные функции по обеспечению делопроизводства, занимаются разработкой внутренней документации, реагируют на вызовы и запросы внешней среды, а также обеспечивают актуализацию и стандартизацию внутренних процессов. Поэтому в настоящий момент, в связи с современными тенденциями цифровизации и переходом от реального производства к цифровым двойникам, появилась задача, связанная с возможностью перевода всей документации в цифровую среду.

Проблематика цифровой трансформации процессов

Новыми технологическими трендами, характерными для отечественной отрасли, являются повсеместная цифровизация производственных систем, переход к цифровой экономике организации и прослеживаемость практически всех процессов. На пути к подобной трансформации возникает множество барьеров, связанных со сложившимися традициями, механистическими подходами к реализации процессов, отсутствием должной инфраструктуры, низкой компетентностью стейкхолдеров и другими проблемами, такими как консерватизм и нежелание принимать изменения среды. Это традиционные сложности [1, 2], с которыми встречаются все новые технологии, так как по большей части организацион-

ная система сопротивляется любым изменениям, которые несет внешняя среда. В данном случае, в зависимости от масштабности организационной системы, ее гибкости и собственных специализированных параметров, связанных с возрастом персонала, уровнем образования, специфической технологических процессов производственной системы, процессы трансформации могут занимать от года до пяти лет. Все они достаточно долгие и трудоемкие по отношению к существующим цепочкам создания ценности. Поэтому процесс цифровой трансформации организационных систем – благородная и трудоемкая задача в современных условиях. Модная тенденция, ведущая к созданию цифровых двойников, является серьезной предпосылкой для появления новых взглядов и принятия нестандартных решений в ответ на вызовы внешней среды. Поэтому все подобные факторы подталкивают к формированию механизмов и первым шагам к самоанализу для подготовки к ответу на вызовы внешней среды.

Анализ возможностей цифровизации документооборота

Прежде чем приступать к подобного рода мероприятиям, необходимо провести первичный анализ с целью выяснения ситуации и четкого принятия решения, о каком количестве документов может идти речь. Для этого необходим полный внутренний итерационный аудит на предмет классификации документов по степени критичности. По результатам подобных мероприятий можно будет сделать вывод о том, что

появилось несколько групп: документы, носящие вспомогательный характер, имеющие хождение только внутри организации и с меньшей трудоемкостью изменения, которые могут быть переведены в цифровую среду; документы, которые необходимо предоставлять представителю заказчика или в другие структуры внешних организаций по их требованию. Таким образом, подобные виды документов останутся именно в том состоянии, которое соответствует требованиям среды.

Для детального анализа внутреннего содержания процессов необходимо разработать формы и протоколы с целью создания механизма мониторинга существующих видов документов и существующих отделов, в которых можно провести документарную унификацию. Создание рационального количества документов, которые можно перевести в цифровую среду [3–5] без серьезных ресурсных издержек, связанных с изменением инфраструктуры, обучением персонала и подключением новых специализированных программ, – это перспективная задача для функционального менеджмента организационной системы, желающего идти в ногу со временем. Для решения подобных задач будут удобны инструменты качества и методы в области структурирования функции качества.

Для начала стоит создать матрицу функции процессов для процессной цепочки или для фрагмента процессной цепочки, в которой участвует структурное подразделение, представить набор документов, необходимый для обеспечения прослеживаемости изделий или продуктов в зависимости от специфики и масштаба производственной системы, и определить их значимость по отношению к конечному результату.

- Фрагмент матрицы функций структурного подразделения
- *Fragment of the matrix of functions of the structural unit*

Документ /функция	Контроль рисков	Регламентный этап	Контроль качества
Извещение о несоответствии	Управление несоответствующей продукцией	Задание на проведение входного контроля	Входной контроль покупных комплектующих изделий (ПКИ)
Акт исследования	Управление несоответствующей продукцией	Протокол входного контроля	Входной контроль ПКИ
Рекламационный акт	Управление несоответствующей продукцией	Журнал учета результатов входного контроля	Входной контроль ПКИ
Уведомление о вызове представителя поставщика	Управление несоответствующей продукцией	Протокол приемо-сдаточных испытаний	Приемочный контроль
Технический акт	Управление несоответствующей продукцией	Извещение о предъявлении продукции на приемо-сдаточные испытания	Приемочный контроль
Акт о браке	Управление несоответствующей продукцией	Акт технической приемки	Приемочный контроль



- *Возможности по цифровизации документации*
- *Opportunities for digitalization of documentation*

Таким образом, вторым шагом будет определение внутри матрицы функций и силы связи представленного документа по отношению к той функции, которую выполняет отдел, причем в данном случае необходимо указывать полную номенклатуру документов структурного подразделения или департамента, в котором проводят исследование, с целью неупущения каждой единицы документооборота, даже тех документов, которые имеют косвенное отношение к цепочке создания ценности, таких как инструкции по технике безопасности, рабочие инструкции и другие вспомогательные документы.

На рисунке показаны данные о фактически оформленных документах по процессам, приведенным в таблице, и дана предварительная оценка возможности цифровизации данных документов. Сокращение бумажного документооборота

в рассматриваемых процессах предварительно оценивается в 76 %, что демонстрирует значительный потенциал для увеличения производительности труда и сокращения трудозатрат на оформление необходимой документации.

Таким образом, использование инструментов внутренней актуализации сформирует определенный массив данных с четкой последовательностью, коррелирующей с основной цепочкой создания ценности. Следует также для полноты представления роли структуры и назначения этих документов распределить степень значимости и вклад, который вносят документы структурных подразделений в цепочку создания ценности конечного продукта. Подобные решения будут иметь широкое применение для тех организационных систем, в которых существует большой разброс регламентирующих и организационно-распорядительных документов на все виды деятельности.

Заключение

Рассматриваемый инструментарий и подходы при правильной организации и достаточной мотивации руководства позволяют анализировать процессы документооборота, заниматься цифровизацией документации, что дает возможность сокращать временные издержки на документальное оформление деятельности организации, повышать производительность труда сотрудников из-за сокращения времени, затраченного на оформление документов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белова М. Ю., Назаревич С. А. Машиночитаемые стандарты как часть парадигмы создания цифровых двойников производственных систем // Будущее предприятия в творчестве молодых: сб. докл. Пятой науч.-техн. конф. СПб., 28 мая 2022 г. / АО «Научно-производственное предприятие „Радар ммс“»; Балтийский гос. техн. ун-т «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. СПб.: СИНЭЛ, 2022. С. 191–197.
2. Назаревич С. А., Винниченко А. В. Проблемы и ошибки при организации производства, решаемые методологией бережливого производства // Системный анализ и логистика. 2021. № 4 (30). С. 49–56. Doi: 10.31799/2077-5687-2021-4-49-56.
3. Туровская М. С. Реструктуризация компании как инструмент повышения эффективности ее деятельности // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. Третьей Всерос. науч. конф. СПб., 18–22 апр. 2022 г. СПб.: ГУАП, 2022. С. 230–233.
4. Белова М. Ю., Назаревич С. А. Цифровые двойники для реализации задач национальной программы повышения производительности отечественных предприятий в Российской Федерации // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докл. II Междунар. форума. СПб., 9 нояб. 2022 г. СПб.: ГУАП, 2022. С. 320–322.
5. Ульяновцева С. Автоматизация vs Цифровизация на примере управления документами // БИТ. Бизнес & информационные технологии. 2022. № 1 (114). С. 48–51.

REFERENCES

1. Belova M. Yu., Nazarevich S. A. Machine-readable standards as part of the paradigm of creating digital twins of production systems. The future of the enterprise is in the work of the young: a collection of reports of the Fifth scientific and technical conference, SPb., 28 May 2022; JSC Scientific and Production Enterprise Radar mms; Baltic State Technical University "Voenmekh" D. F. Ustinova. SPb.: SINEL; 2022, pp. 191–197. (In Russ.).
2. Nazarevich S. A., Vinnichenko A. V. Problems and errors in the organization of production, solved by the methodology of lean production. System analysis and logistics. 2021;(4(30)):49–56. (In Russ.). Doi: 10.31799/2077-5687-2021-4-49-56.
3. Turovskaya M. S. Company restructuring as a tool to improve the efficiency of its activities. Modeling and situational quality management of complex systems: Collection of reports of the Third All-Russian scientific conference. SPb., 18–22 April 2022. SPb.: SUAI; 2022, pp. 230–233. (In Russ.).
4. Belova M. Yu., Nazarevich S. A. Digital twins for the implementation of the tasks of the national program to increase the productivity of domestic enterprises in the Russian Federation. Mathematical methods and models in high-tech production: Collection of abstracts of the II International forum. SPb., 09 November 2022. SPb.: SUAI; 2022, pp. 320–322. (In Russ.).
5. Ulyantseva S. Automation vs Digitalization on the example of document management. BIT. Business & information technology. 2022;(1(114)):48–51. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Шашмури́н Анто́н Алекса́ндрович, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – анализ и моделирование бизнес-процессов, анализ состояния организационных систем.

Shashmurin Anton A., Senior Lecturer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – the analysis and modeling of business processes, the analysis of the state of organizational systems.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 11.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 28.04.2023

Корреляционная матрица для сложноструктурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса

Александра Валерьевна Винниченко¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Представлены результаты анализа связей между поведенческими факторами оператора технологической линии и параметрами технологического процесса. Выявлены группы показателей, которым присваиваются ранжированные весовые коэффициенты экспертным методом. На основе этих данных рассчитывается и формируется корреляционная матрица, позволяющая выделить наиболее значимые параметры, которые могут быть использованы для управления и контроля технологического процесса. Кроме того, анализ полученных результатов может выделить стратегические задачи для улучшения качества продукции, оптимизации производственных процессов и повышения эффективности производства.

Ключевые слова: корреляционная матрица, поведенческие факторы оператора, технологический процесс, влияние факторов производства

Для цитирования: Винниченко А. В. Корреляционная матрица для сложноструктурированных поведенческих факторов и параметров технологического процесса // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2, № 4. С. 88–92. DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-88-92.

Original article

Correlation matrix for complex structured behavioral factors and process parameters

Alexandra V. Vinnichenko¹

✉ alex23rain@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3317-4723

¹ Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The results of the analysis of the links between the behavioral factors of the operator of the technological line and the parameters of the technological process are presented. Groups of indicators have been identified, which are assigned ranked weighting coefficients by the expert method. Based on these data, a correlation matrix is calculated and formed, which allows to identify the most significant parameters that can be used to control and control the technological process. In addition, the analysis of the results obtained can highlight strategic objectives for improving product quality, optimizing production processes and increasing production efficiency.

Keywords: correlation matrix, behavioral factors of the operator, technological process, influence of production factors

For citation: Vinnichenko A. V. Correlation matrix for complex structured behavioral factors and process parameters. *Innovacionnoe priborostroenie = Innovative Instrumentation*. 2023;2(4):88–92. (In Russ.). DOI: 10.31799/2949-0693-2023-4-88-92.

Введение

В современных условиях производственные системы и бизнес-процессы становятся все более сложными и структурированными, увеличивается количество поведенческих факторов и параметров технологического процесса (ТП), которые взаимодействуют друг с другом и влияют на производительность и эффективность процесса. Необходимость учета взаимосвязи между показателями состояния оператора технологической линии и показателями технологического процесса обусловлена тем, что оператор является одним из

важнейших элементов в системе «оператор – оборудование – процесс» [1].

Например, длительность работы без перерывов оператора может привести к утомлению и снижению концентрации внимания, что, в свою очередь, влечет за собой частое допущение ошибок. Это может негативно повлиять на показатели технологического процесса, такие как производительность, качество продукции и затраты на устранение ошибок. Поэтому при оценке состояния оператора технологической линии необходимо учитывать его взаимосвязь с показателями технологического процесса, чтобы своевременно

выявить причины возможных проблем и принять меры по их устранению.

Корреляционная матрица позволяет определить, какие факторы и параметры взаимосвязаны между собой. Это может помочь выявить наиболее важные поведенческие факторы операторов и параметры технологического процесса, которые необходимо оптимизировать для улучшения производительности и эффективности процесса. Например, установление корреляции между эмоциональным состоянием сотрудника и его работоспособностью может помочь определить, какие действия можно предпринять для повышения эффективности работы [2].

Материал и методы исследования

В технологических процессах часто возникает необходимость постоянного мониторинга технологических операций для оценки результативности предприятия, для чего также проводится анализ состояния оператора технологической линии и тех параметров, которые могут влиять на результаты процесса. Для этого необходимо определить степень взаимосвязи между различными

переменными – какие переменные являются наиболее значимыми для процесса и как они взаимодействуют друг с другом. Такое исследование даст возможность выявить основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на производительность, и улучшить качество процесса, повысив его результативность и эффективность [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели состояния оператора технологической линии, а также параметры технологического процесса были определены на основе особенностей организаций приборостроительной отрасли. Следует отметить, что в зависимости от специфики организации набор параметров, как состояния оператора, так и технологического процесса, может варьироваться [4]. Поскольку исследуемые данные являются лингвистическими переменными, им присваиваются весовые коэффициенты, ранжируемые по значимости в порядке убывания, на основе опыта экспертов, владеющих знаниями о протекании исследуемого технологического процесса (табл. 1; 2). Также

- Таблица 1. Поведенческие факторы оператора ТП
- Table 1. Behavioral factors of the technological process operator

Номер	Поведенческий фактор оператора ТП	Ранжированный весовой коэффициент № 1	Ранжированный весовой коэффициент № 2	Ранжированный весовой коэффициент № 3
1	Длительность работы без перерывов	0,06	0,07	0,05
2	Количество ошибок, допущенных при выполнении задач	0,08	0,07	0,05
3	Скорость выполнения задач	0,07	0,08	0,15
4	Стрессоустойчивость	0,06	0,06	0,06
5	Концентрация внимания	0,04	0,06	0,06
7	Социальные навыки	0,05	0,06	0,01
8	Гибкость в переключении между задачами	0,07	0,05	0,07
9	Лояльность к работодателю	0,06	0,08	0,06
10	Коммуникабельность и умение работать в команде	0,07	0,06	0,09
11	Самодисциплина и самоконтроль	0,06	0,06	0,03
12	Мотивация к выполнению задач	0,06	0,07	0,03
13	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,06	0,07	0,07
14	Ответственность и исполнительность	0,06	0,07	0,07
15	Устойчивость к изменениям в рабочем процессе	0,09	0,07	0,11
16	Знание технических аспектов работы	0,11	0,07	0,09
Сумма		1,00	1,00	1,00

- Таблица 2. Поведенческие факторы оператора ТП
- Table 2. Behavioral factors of the technological process operator

Номер	Параметр ТП	Ранжированный весовой коэффициент № 1	Ранжированный весовой коэффициент № 2	Ранжированный весовой коэффициент № 3
1	Скорость производства	0,07	0,05	0,03
2	Выходной контроль качества продукции	0,07	0,01	0,08
3	Время цикла производства	0,08	0,10	0,05
4	Количество брака и отходов	0,06	0,09	0,06
5	Уровень энергопотребления	0,06	0,05	0,09
6	Затраты на сырье и материалы	0,06	0,05	0,08
7	Техническая доступность оборудования	0,05	0,07	0,07
8	Количество переработок и повторной обработки	0,08	0,11	0,06
9	Уровень аварийности и безопасности	0,06	0,07	0,08
10	Квалификация персонала	0,06	0,07	0,01
11	Процент автоматизации технологических процессов	0,07	0,09	0,12
12	Соотношение количества сбоев и время их устранения	0,07	0,04	0,06
13	Техническая готовность оборудования к производству	0,07	0,08	0,09
14	Количество операций по обслуживанию и контролю оборудования	0,07	0,07	0,01
15	Количество человеко-часов, затраченных на производство продукции	0,07	0,05	0,11
Сумма		1,00	1,00	1,00

в зависимости от специфики организации количество экспертов, участвующих в составлении матрицы влияния исследуемых факторов, может меняться.

После исследования весовых коэффициентов рассчитываются корреляционные значения и заносятся в матрицу (рисунок).

Каждая ячейка в таблице показывает корреляцию между двумя исследуемыми переменными. Чем ближе коэффициент корреляции к 1,0, тем сильнее положительное влияние на параметры; соответственно, чем ближе коэффициент корреляции к -1,0, тем сильнее отрицательное влияние на параметры, что характеризует необходимость применения корректирующих действий на данные пары факторов для изменения степени воздействия. Анализируя полученную матрицу, можно проследить степень взаимосвязи между сложноструктурированными поведенческими факторами и параметрами технологического процесса.

Корреляционная матрица может быть использована для определения наиболее значимых свя-

зей между факторами и параметрами, что позволит лучше понимать влияние человеческого фактора на технологический процесс. Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций и оптимизации производственных процессов, в том числе для улучшения качества продукции, снижения затрат и повышения эффективности производства.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что данный метод анализа влияния факторов является эффективным инструментом для определения связей между различными переменными и выявления факторов, которые оказывают наибольшее влияние на производительность и эффективность процесса. Использование корреляционной матрицы для анализа поведенческих факторов и параметров технологического процесса может быть полезно для различных организаций, которые стремятся

		№ n/n			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Сумма
		Параметры ПП			Скорость производства	Выходной качество продукции	Время цикла производства	Количество брака и отходов	Уровень энергопотребления	Затраты на сырье и материалы	Техническую доступность оборудования	Количество переработок повторной обработки	Уровень аварийности и безопасности	Квалификацию персонала	Процент автоматизации технологических	Соотношение количества сбоев и время их	Техническую готовность оборудования к	Количество операций по обслуживанию и контроль оборудования	Количество человеко-часов, затраченных на производство продукции	
№ n/n	Поведенческие факторы оператора ПП	В.К.№1			0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	1,00
		В.К.№2			0,05	0,01	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,11	0,07	0,09	0,04	0,08	0,08	0,07	0,05	1,00
		В.К.№3			0,03	0,08	0,05	0,06	0,09	0,08	0,07	0,06	0,08	0,01	0,12	0,06	0,09	0,01	0,11	1,00
1	Длительность работы без перерывов	0,06	0,07	0,05	0,50	-0,92	0,99	0,87	-0,96	-0,98	0,00	0,99	-0,50	0,93	-0,60	-0,65	-0,50	0,87	-0,98	
2	Количество ошибок, допущенных при выполнении задач	0,08	0,07	0,05	0,98	-0,32	0,74	0,19	-0,84	-0,79	-0,76	0,56	-0,98	0,88	-1,00	0,14	-0,98	0,94	-0,79	
3	Скорость выполнения задач	0,07	0,08	0,15	-0,92	0,52	-0,87	-0,40	0,94	0,90	0,60	-0,73	0,92	-0,96	0,96	0,08	0,92	-0,99	0,90	
4	Стрессоустойчивость	0,06	0,05	0,06	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76	
5	Концентрация внимания	0,04	0,06	0,06	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19	
7	Социальные навыки	0,05	0,06	0,01	0,76	-0,75	0,98	0,65	-1,00	-0,99	-0,33	0,90	-0,76	1,00	-0,83	-0,37	-0,76	0,98	-0,99	
8	Гибкость в переключении между задачами	0,07	0,05	0,07	0,00	0,99	-0,80	-1,00	0,69	0,76	-0,50	-0,92	0,00	-0,63	0,11	0,94	0,00	-0,50	0,76	
9	Лояльность к работодателю	0,06	0,08	0,06	0,00	-0,99	0,80	1,00	-0,69	-0,76	0,50	0,92	0,00	0,63	-0,11	-0,94	0,00	0,50	-0,76	
10	Коммуникабельность и умение работать в команде	0,07	0,06	0,09	-0,65	0,84	-1,00	-0,76	1,00	1,00	0,19	-0,95	0,65	-0,98	0,74	0,50	0,65	-0,94	1,00	
11	Самодисциплина и самоконтроль	0,06	0,06	0,03	0,87	-0,61	0,92	0,50	-0,97	-0,94	-0,50	0,80	-0,87	0,99	-0,92	-0,19	-0,87	1,00	-0,94	
12	Мотивация к выполнению задач	0,06	0,07	0,03	0,72	-0,78	0,99	0,69	-1,00	-1,00	-0,28	0,92	-0,72	1,00	-0,80	-0,42	-0,72	0,97	-1,00	
13	Уровень стремления к самосовершенствованию	0,06	0,07	0,07	-0,87	-0,38	-0,11	0,50	0,28	0,19	1,00	0,11	0,87	-0,36	0,80	-0,76	0,87	-0,50	0,19	
14	Ответственность и исполнительность	0,06	0,08	0,07	-0,50	-0,79	0,40	0,87	-0,24	-0,33	0,87	0,60	0,50	0,16	0,40	-0,98	0,50	0,00	-0,33	
15	Устойчивость к изменениям в рабочем процессе	0,09	0,07	0,11	-0,50	0,92	-0,99	-0,87	0,96	0,98	0,00	-0,99	0,50	-0,93	0,60	0,65	0,50	-0,87	0,98	
16	Знание технических аспектов работы	0,11	0,07	0,09	0,50	0,79	-0,40	-0,87	0,24	0,33	-0,87	-0,60	-0,50	-0,16	-0,40	0,98	-0,50	0,00	0,33	
Сумма		1,00	1,00	1,00																

- Корреляционная матрица
- Correlation matrix

повысить эффективность производственных процессов, улучшить качество продукции и снизить затраты. Для более детального анализа связей между переменными и определения их влияния

на результаты технологического процесса, а также моделирования будущей зависимости исследуемых пар данных целесообразно применять регрессионный анализ [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Винниченко А. В., Назаревич С. А. Исследование учета продолжительности трудовых операций и оценка технико-экономических показателей технологического процесса // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Тезисы докл. V Междунар. форума. СПб.: ГУАП, 2023. С. 211–213.
2. Дубровин А. В. Классификация и характеристика многофакторных статистических экспериментов // Инновации и инвестиции. 2021. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-i-harakteristika-mnogofaktornyh-statisticheskikh-eksperimentov> (дата обращения: 11.04.2023).
3. Недошивин С. В. Комплексный машинный эксперимент по исследованию технологических процессов, представленных детерминированной моделью // Известия ТулГУ. Техн. науки. 2015. № 8-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyu-mashinnyu-eksperiment-po-issledovaniyu-tehnologicheskikh-protsessov-predstavlennyh-determinirovannoy-modelyu> (дата обращения: 11.04.2023).

4. Винниченко А. В., Назаревич С. А. Предиктивный анализ пиковых численных характеристик при переналадке групповых технологических процессов синхронизированного производства // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. III Всерос. науч. конф. СПб.: ГУАП, 2022. С. 129–133. Doi: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.
5. Будникова И. К., Приймак Е. В. Моделирование показателей качества технологического процесса с применением программы Statistica // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2012. № 15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-pokazateley-kachestva-tehnologicheskogo-protsessa-s-primeneniem-programmy-statistica> (дата обращения: 11.04.2023).

REFERENCES

1. Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. Study of accounting for the duration of labor operations and assessment of technical and economic indicators of the technological process. Metrological support of innovative technologies: Abstracts of the V International forum. SPb.: SUAI; 2023, pp. 211–213. (In Russ.).
2. Dubrovin A. V. Classification and characterization of multifactorial statistical experiments. Innovations and investments. 2021;(4). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsiya-i-harakteristika-mnogofaktornyh-statisticheskikh-eksperimentov> [Accessed 11 April 2023].
3. Nedoshivin S. V. Complex machine experiment for the study of technological processes represented by a deterministic model. News of TulSU. Technical sciences. 2015;(8-1). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnyy-mashinny-eksperiment-po-issledovaniyu-tehnologicheskikh-protsessov-predstavlenykh-determinirovannoy-modelyu> [Accessed 11 April 2023].
4. Vinnichenko A. V., Nazarevich S. A. Predictive analysis of peak numerical characteristics during the readjustment of group technological processes of synchronized production. Modeling and situational quality management of complex systems. Collection of reports of the III All-Russian scientific conference SPb.: SUAI; 2022, pp. 129–133. (In Russ.). Doi: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.
5. Budnikova I. K., Priymak E. V. Modeling of technological process quality indicators using the Statistica program. Bulletin of Kazan Technological University. 2012;(15). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-pokazateley-kachestva-tehnologicheskogo-protsessa-s-primeneniem-programmy-statistica> [Accessed 11 April 2023].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Винниченко Александра Валерьевна, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

Область научных интересов – моделирование и проектирование бережливых производственных систем, автоматизированные системы управления.

Vinnichenko Alexandra V., Senior Lecturer at the Department of Innovation and Integrated Quality Systems, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation.

Research interests – modeling and design of lean production systems, automated control systems.

Поступила в редакцию 11.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 28.04.2023

Received 11.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 28.04.2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ,
СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
КАЧЕСТВОМ

- Третьяков Н. К., Кузьменко В. П.,
Солёная О. Я.** Проектирование системы
управления активного фильтра
гармоник..... 5
- Винниченко А. В., Истомина Ю. П.** Методы
анализа качества в прогнозировании
моделей машинного обучения..... 11
- Назаревич С. А.** Проблемы применения
показателей результативности
и ключевых показателей эффективности
для организационной системы..... 16

РАДИОТЕХНИКА,
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ СВЯЗИ

- Солёный С. В., Воропаев И. А.,
Давиденко М. Н.** Повышение производи-
тельности веб-приложений
на Asp.NETCore 23
- Ланцов К. В., Ланцов В. В., Корякин А. В.,
Мартынова Л. А.** Амплитудный метод
определения параметров движения
малоразмерных роботизированных
комплексов 30
- Вагизов М. Р., Хабаров С. П., Потапов А. П.**
Технология построения в Hugin Lite наивного
байесовского классификатора
на основе исходного набора данных 41

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУКИ
И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Назаревич С. А., Свириденко А. В.**
Исследование температурных режимов
филаментизации PLA-пластика
при прототипировании 51
- Рысин А. В., Солёный С. В.** Оценка техни-
ческого состояния воздушных линий
электропередачи 56
- Иванов М. Е., Езерский В. В., Беляков А. А.**
Сравнительный анализ классической
и интеллектуальной систем автомати-
ческого управления углом крена
низколетящего аппарата 61

CONTENTS

INSTRUMENTATION, METROLOGY,
STANDARDIZATION AND QUALITY
MANAGEMENT

- Tretiakov N. K., Kuzmenko V. P.,
Solenaya O. Ya.** Designing an active
harmonic filter control system..... 5
- Vinnichenko A. V., Istomina Yu. P.** Methods
of quality analysis in predicting machine
learning models..... 11
- Nazarevich S. A.** Problems of application
of performance indicators and key
performance indicators for
an organizational system 16

RADIO ENGINEERING, INFOCOMMUNICATION
TECHNOLOGIES AND COMMUNICATION
SYSTEMS

- Solyonyj S. V., Voropaev I. A.,
Davidenko M. N.** Improving the
performance of Asp.NETCore web
applications 23
- Lantsov K. V., Lantsov V. V., Koryakin A. V.,
Martynova L. A.** Amplitude method for
determining the motion parameters
of small-sized robotic systems 30
- Vagizov M. R., Khabarov S. P., Potapov A. P.**
Technology for building a naive Bayes
classifier in Hugin Lite based
on the original dataset 41

FUNDAMENTAL SCIENCES AND APPLIED
RESEARCH

- Nazarevich S. A., Sviridenko A. V.** Research
of temperature regimes of filamentation
of PLA plastic during prototyping..... 51
- Rysin A. V., Solyonyj S. V.** Assessment
of the technical condition of overhead
power lines 56
- Ivanov M. E., Ezerskiy V. V., Belyakov A. A.**
Comparative analysis of classical and
intelligent systems of automatic roll
angle control of a low-flying vehicle 61

**Смирнов А. О., Дик О. Е., Фролова Е. А.,
Титов В. Е.** Оценка синхронизации времен-
ных рядов для анализа дезадаптационных
расстройств 68

Мателенок И. В. Видимость малых возго-
раний сквозь кроны деревьев: некоторые
результаты натуральных исследований
на территории Ленинградской области..... 76

ЦИФРОВАЯ ЭКОНОМИКА
И УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Шашмулин А. А. Особенности унификации
количества нормативно-технической доку-
ментации в структурном подразделении
на основании принципов функциональ-
ной ценности 84

Винниченко А. В. Корреляционная матрица
для сложноструктурированных поведен-
ческих факторов и параметров
технологического процесса..... 88

**Smirnov A. O., Dick O. E., Frolova E. A.,
Titov V. E.** Evaluation of time series
synchronization for the analysis
of disadaptation disorders 68

Matelenok I. V. Visibility of small fires
through tree crowns: some results
of field studies in the Leningrad region 76

DIGITAL ECONOMY AND ORGANIZATION
MANAGEMENT

Shashmurin A. A. Features of unification
of the quality of normative and technical
documentation in a structural division
on the basis of the principles of
functional value 84

Vinnichenko A. V. Correlation matrix
for complex structured behavioral factors
and process parameters..... 88