

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 2 (74)

2025

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Баканова Н. Б., Печерский А. В., Фионова Л. Р.* Стратегия управления в системе документационного обеспечения по критерию риска с целью оптимизации..... 3
- Бабич М. Ю., Бабич А. М.* Концепции ведения силовых конкуренций специализированных систем и возможность их моделирования..... 12

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

- Браже Р. А., Лебедев Е. Ю.* Исследование фрактальных патч-антенн в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот 29
- Зиятдинов С. И., Красильникова О. И.* Селекция движущихся целей бортовой радиолокационной станции с внешней когерентностью 41
- Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянов Н. С., Цыпин Б. В.* Особенности обработки сигнала вихретокового датчика 52
- Зув С. М., Константинов И. Ю.* Усовершенствование оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков и исследование ее характеристик 64
- Трошин А. А., Балахонова И. В.* Прогнозирование уровня дефектов производства печатных плат на базе их расчетной надежности..... 77
- Седышев В. В.* Метод измерения угловой скорости воздушного потока..... 89

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Курносов Н. Е., Лебединский К. В., Накашидзе Ю. Ю.* Соединения с натягом, собираемые осевым способом и экспериментальное определение их герметичности по предложенному техническому решению..... 98
- Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончарова Г. А.* Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании 110
- Зверовщиков А. Е., Борисов Д. А.* Эффект сублимации в технологии центробежно-дугового диспергирования карбида вольфрама..... 126

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (74)

2025

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

- Bakanova N.B., Pecherskiy A.V., Fionova L.R.* Risk-based management strategy in the documentation support system in order to optimize..... 3
- Babich M.Yu., Babich A.M.* Concepts of conducting power competitions of specialized systems and the possibility of their modeling..... 12

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

- Brazhe R.A., Lebedev E.Yu.* Studying the fractal patch antennas in the gigahertz and terahertz frequency ranges..... 29
- Ziatdinov S.I., Krasilnikova O.I.* Selection of moving targets of an airborne radar station with external coherence 41
- Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsypin B.V.* Features of eddy current sensor signal processing 52
- Zuev S.M., Konstantinov I.Yu.* Improvement of an optical-electronic system based on infrared sensors and investigation of its characteristics..... 64
- Troshin A.A., Balakhonova I.V.* Predicting the level of nonconformities (defects) in printed circuit board production based on their calculated reliability..... 77
- Sedyshev V.V.* Method for measuring the angular velocity of airflow..... 89

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

- Kurnosov N.E., Lebedinskiy K.V., Nakashidze Yu.Yu.* Tension joints assembled by axial method and experimental determination of their tightness according to the proposed technical solution 98
- Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharova G.A.* A methodical approach for determining the components of forces during continuous centerless grinding 110
- Zverovshchikov A.E., Borisov D.A.* The sublimation effect in the technology of centrifugal arc dispersion of tungsten carbide 126

**ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

УДК 351.651

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-1

**Стратегия управления в системе документационного
обеспечения по критерию риска с целью оптимизации**

Н. Б. Баканова¹, А. В. Печерский², Л. Р. Фионова³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹dolcce@yandex.ru, ²ura258@yandex.ru, ³lrfionova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является система документационного обеспечения управления в организациях и проектной деятельности. Предмет исследования – управление документационными процессами в системе. Цель – разработка и применение стратегии оптимизации документооборота на основе анализа рисков. *Материалы и методы.* Решение задачи управления в системе документационного обеспечения управления производится на основе системного анализа моделей документных процессов и событий рисков. *Результаты.* Предложена стратегия управления в системе документационного обеспечения по критерию рисков. *Выводы.* Предложенный метод позволяет сформировать стратегию управления рисками с учетом результатов системного анализа межэлементных связей и моделей надежности и оптимизировать управление документными процессами и затраты на профилактику рисков.

Ключевые слова: документные процессы, системный анализ, оптимизация, риски, управление

Для цитирования: Баканова Н. Б., Печерский А. В., Фионова Л. Р. Стратегия управления в системе документационного обеспечения по критерию риска с целью оптимизации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 3–11. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-1

**Risk-based management strategy in the documentation
support system in order to optimize**

N.B. Bakanova¹, A.V. Pecherskiy², L.R. Fionova³

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹dolcce@yandex.ru, ²ura258@yandex.ru, ³lrfionova@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is the system of documentation support for management in organizations and project activities. The subject of the research is the

management of documentation processes in the system. The purpose of the study is to develop and apply a workflow optimization strategy based on risk analysis. *Materials and methods.* The management task in the management documentation support system is solved based on a systematic analysis of models of document processes and risk events. *Results.* The management strategy in the documentation support system according to the risk criterion is proposed. *Conclusions.* The proposed method makes it possible to formulate a risk management strategy based on the results of a systematic analysis of inter-element relationships and reliability models and optimize the management of document processes and the costs of risk prevention.

Keywords: document processes, system analysis, optimization, risks, management

For citation: Bakanova N.B., Pecherskiy A.V., Fionova L.R. Risk-based management strategy in the documentation support system in order to optimize. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):3–11. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-1

Введение

Одной из ключевых задач по обеспечению эффективности управления в социально-технических системах является оптимизация информационных и документных процессов, обеспечивающих принятие решений в динамике управления. Для этого авторы рассматривают систему документационного обеспечения управления (СДОУ) [1–7], в которой анализируются специфика и динамика элементов и связей, технологические процессы обработки документированной информации. В соответствующих информационных моделях выделяются следующие компоненты [8]: технические средства обработки информации на различных носителях, каналы транзакции, а также субъекты управления в СДОУ. Так, движение документированной информации соответствует обобщенной модели (рис. 1).



Рис. 1. Модель технологического процесса обработки документированной информации в СДОУ

Очевидно, что нештатное функционирование СДОУ на любом из этих этапов может приводить к событиям риска в трактовке ГОСТ Р 57551–2017 «Информация и документация. Оценка рисков для документных процессов и систем». При этом авторами статьи рассмотрены риски документных процессов и систем в контексте надежности системной конструкции СДОУ [9–14]. Методы оценки надежности таких систем приведены в стандарте ГОСТ Р 51901.14–2005 «Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности». Однако реальные модели расчета параметров событий риска по показателям надежности значительно сложнее. Пример моделей рассмотрен авторами в работах [10, 11, 15].

В работе [1] авторами предложен подход к оптимизации управления в СДОУ по критерию рисков с учетом ГОСТ Р 57551–2017, который, к сожалению, не дает рекомендаций по управлению рисками. Концептуально эта задача обстоятельно рассмотрена для упорядоченной материально-энергетической совокупности природных объектов и технических сооружений в работах [2–6]. Анализ опыта управления рисками для техногенных систем позволяет определить стратегию управления рисками в СДОУ с учетом ее системной специфики.

3. Актуальность задачи обоснования стратегии и технологии оптимизации по критерию риска

Актуальность задачи оптимизации документооборота в производственной, административной, финансовой сферах или в области безопасности обусловлена тенденцией к увеличению неопределенности в оценках внутреннего состояния системы, внешних и внутренних деструктивных воздействий. Это связано с непрерывным увеличением потока и скорости обработки документированной информации в информационном обществе, активным переходом на электронный документооборот.

Руководством по выбору и применению технологий оценки риска в широком спектре задач призван стать ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска». Стандарт дает самые общие рекомендации. Но они имеют практическое значение с учетом анализа особенностей СДОУ и накопленного авторами опыта для решения задачи обоснования стратегии и технологии оптимизации в СДОУ по критерию риска.

2. Технологии анализа средств контроля в системе управления рисками

В публикациях [8, 12, 16, 17] авторы классифицировали возможные события рисков в документных процессах и системах с учетом особенностей таких объектов, как Правительство региона, районная администрация, транспортное железнодорожное предприятие и др. При этом показано, что выявление возможных событий риска предполагает построение структурных схем расчета надежности документных систем и составление их дерева последствий.

В работе [1] анализируются модели иррадиации (распространения) событий риска по системно связанным структурным элементам. Так называемая иррадиация может увеличить тяжесть последствий при отсутствии соответствующей технологии локализации и минимизации последствий риска.

В стандарте ГОСТ Р 58771–2019 рекомендуется построение графической модели типа «галстук-бабочка» для описания и анализа пути развития опасного события от причин до последствий. Для анализа и контроля последствий рискованных событий для СДОУ приведена модель на рис. 2.

В процессе анализа такой модели основное внимание уделяется эффективности экранов (барьеров), обеспечивающих профилактику, локализацию риска, минимизацию ущерба [18, 19].

3. Стратегии управления

В работах [8, 16] авторы рассматривали технологии риск-анализа СДОУ и техногенного объекта. Целью риск-анализа СДОУ является класси-

фикация и идентификация внешних и внутренних рискообразующих факторов. Структурная схема управления рисками в СДОУ приведена на рис. 3.

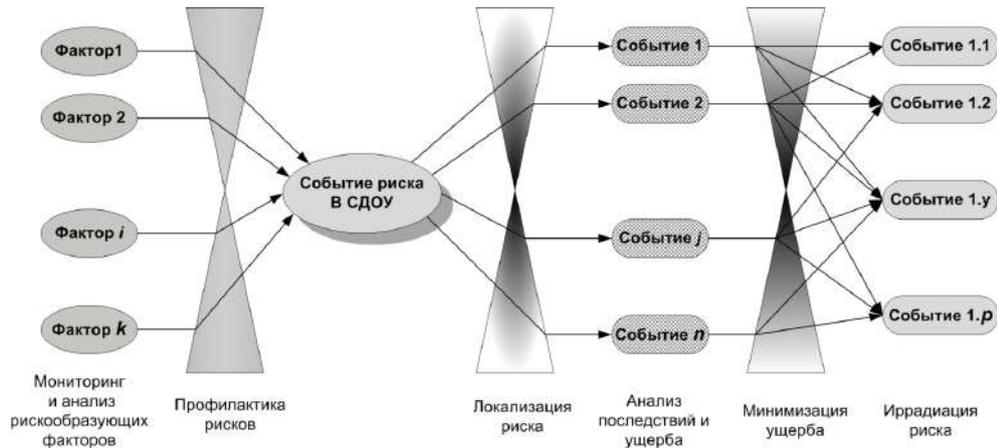


Рис. 2. Модель контроля распространения рисков событий в СДОУ

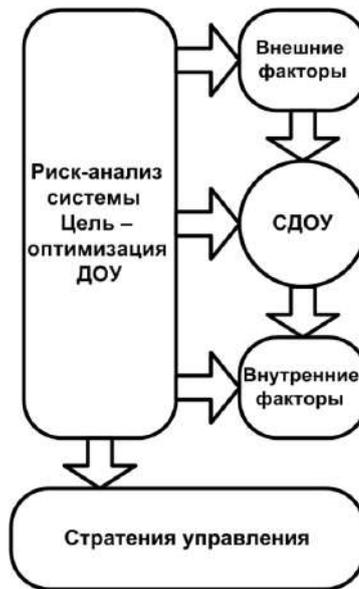


Рис. 3. Структура схемы управления рисками в СДОУ

В теории менеджмента рисков определены концепции: приемлемого риска, оправданного риска, допустимого риска, а также социально-экономического риска. Эти категории во многом определяют выбор и обоснование стратегии управления.

Так, стратегия приемлемого риска основана на принятии как факта, что достижение нулевого риска нереально и экономически невыгодно. Концепции допустимого и социально-экономического рисков в основном находят применение при анализе опасных производств и процессов.

Стратегия управления рисками на основе концепции приемлемого риска для СДОУ приведена на рис. 4.

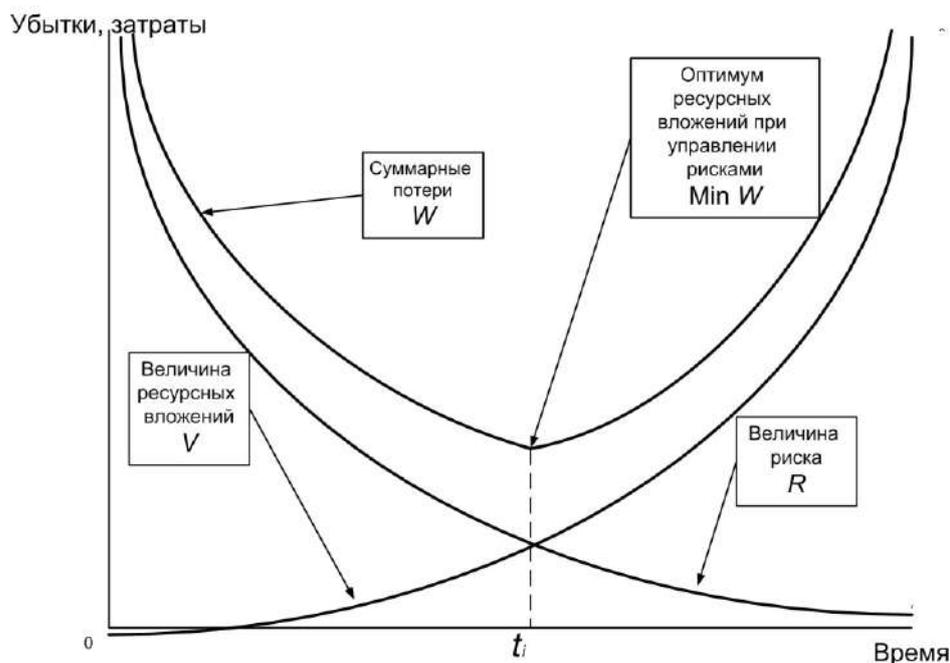


Рис. 4. Стратегия управления рисками на основе концепции приемлемого риска

На рис. 4 показаны суммарные убытки организации при реализации события риска W , величина ресурсных вложений на профилактику риска V , величина риска в текущий момент времени с учетом ресурсных вложений на его профилактику R .

Очевидно, что суммарные потери организации при наличии рисков осуществления документных процессов в СДОУ и проведении профилактики определяются как $W = V + R$.

При этом зона оптимального управления в СДОУ по критерию приемлемого риска соответствует условию $\min W$.

Заключение

Проблема оптимизации управления в системе документационного управления и выбора соответствующей стратегии связана с решением ряда задач в рамках системного подхода. Очевидно, что СДОУ по своему типу определяется как сложная социально-техническая система. При этом анализ системных связей, их динамики и элементов системы позволяет использовать для достижения цели управления известные модели надежности подобных гетерогенных систем.

При моделировании рисков событий в СДОУ следует учитывать возможные явления иррадиации факторов угроз по системно связанным элементам.

Стратегия управления в системе документационного обеспечения управления по критерию риска с целью оптимизации может быть построена по критерию приемлемого риска при условии комплексного учета всех видов затрат, связанных с таким управлением.

Список литературы

1. Баканова Н. Б., Печерский А. В., Фионова Л. Р. Системный подход к оптимизации документных процессов по критерию риска // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 2. С. 73–82.
2. Печерский А. В. Управление рисками террористических угроз безопасности объектов критической инфраструктуры региона // Современные охраняемые технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Россия, Пенза–Заречный, 6–8 октября 2010 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. С. 78–85.
3. Печерский А. В. Мониторинг защищенности объектов радиоэлектроники и информационной сферы региона // Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе : тр. 54-й науч. конф. МФТИ Радиотехника и кибернетика. М. : МФТИ, 2011. Т. 2. С. 103–105.
4. Анализ риска и проблемы безопасности : в 4 ч. Ч. 4. Научно-методическая база риска и безопасности / науч. руковод. К. В. Фролов. М. : МГОФ «Знание», 2007. 864 с.
5. Ильичев А. В. Начала системной безопасности. М. : Научный мир, 2003. 456 с.
6. Афанасьев В. Г. Системность и общество. М. : Политиздат, 1980. 368 с.
7. Антонов А. В. Системный анализ : учебник для вузов. 2-е изд., стер. М. : Высш. шк., 2006. 454 с.
8. Печерский А. В., Дятлов В. В., Киреева А. А. Риск-анализ документных процессов и систем // Информация – коммуникация – документ (ИКД-2020) : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под ред. Л. Р. Фионовой, О. И. Семянковой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 22–27.
9. Янковая В. Ф. Оптимизация документооборота организации // Справочник секретаря и офис-менеджера. 2012. № 5. С. 35–41.
10. Печерский А. В., Артюхина Е. О., Свиридова М. В., Чековитова Н. Ю. Применение когнитивного анализа в задаче повышения эффективности документооборота организации // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. (13–14 апреля 2011 г.) / под ред. Л. Р. Фионовой, А. В. Печерского. Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. С. 12–24.
11. Печерский А. В., Дятлов В. В., Киреева А. А. Сравнительная балльная оценка надежности документных систем и процессов // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. науч. ст. по материалам XXI Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под ред. Л. Р. Фионовой, О. И. Семянковой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 24–30.
12. Печерский А. В., Дятлов В. В., Киреева А. А. Применение моделей надежности для оценки рисков документных процессов и систем // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. ст. по материалам VIII Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 228–231.
13. Печерский А. В., Дятлов В. В. Применение моделей в задачах оценки надежности документных процессов и систем // Информация – коммуникация – документ (ИКД-2021) : сб. ст. по материалам II Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием). Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 141–146.
14. Фионова Л. Р., Епишин И. Г., Репин А. Ю. Анализ рисков жизненного цикла технологического оборудования для опасных производственных объектов при разработке рабочей конструкторской документации // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2013. № 3. С. 176–188.
15. Печерский А. В., Дятлов В. В. Анализ рисков документных процессов на примере эксплуатационного локомотивного депо Пенза // Модернизационные процессы в современной России : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2021. С. 279–282.

16. Фионова Л. Р., Коровина Л. В. Анализ методов оптимизации систем ДОУ // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2015. С. 3–7.
17. Баканова Н. Б. Система показателей состояния документооборота организации // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. 2011. № 26. С. 529–533.
18. Печерский А. В., Баканова Н. Б., Фионова Л. Р. К задаче анализа рисков в технологических системах документационного обеспечения управления // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. ст. по материалам XXIII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под ред. Л. Р. Фионовой, О. И. Семянковой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 150–155.
19. Печерский А. В., Дятлов В. В. Применение моделей на основе Марковского анализа в задачах оценки надежности документных процессов и систем // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении : сб. науч. ст. по материалам XXII Всерос. науч.-практ. конф. (с международным участием) / под ред. Л. Р. Фионовой, О. И. Семянковой. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 136–140.

References

1. Bakanova N.B., Pecherskiy A.V., Fionova L.R. A systematic approach to optimizing document processes based on risk criteria. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2024;(2):73–82. (In Russ.)
2. Pecherskiy A.V. Risk management of terrorist threats to the security of critical infrastructure facilities in the region. *Sovremennye okhrannye tekhnologii i sredstva obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti ob"ektov: materialy VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. (Rossiya, Penza–Zarechnyy, 6–8 oktyabrya 2010 g.) = Modern security technologies and means of ensuring comprehensive security of objects: proceedings of the 8th All-Russian scientific and engineering conference (October 6-8, 2010, Penza-Zarechniy, Russia).* Penza: Izd-vo PGU, 2010:78–85. (In Russ.)
3. Pecherskiy A.V. Monitoring the security of radio electronics and information sphere objects in the region. *Problemy fundamental'nykh i prikladnykh estestvennykh i tekhnicheskikh nauk v sovremennom informatsionnom obshchestve: tr. 54-y nauch. konf. MFTI Radiotekhnika i kibernetika = Problems of fundamental and applied natural and technical sciences in the modern information society: proceedings of the 54th scientific conference of Moscow Institute of Physics and Technology Radio engineering and cybernetics.* Moscow: MFTI, 2011;2:103–105. (In Russ.)
4. Frolov K.V. (sci. ad.). *Analiz riska i problemy bezopasnosti: v 4 ch. Ch. 4. Nauchno-metodicheskaya baza riska i bezopasnosti = Risk analysis and safety issues: in 4 parts. Part 4. Scientific and methodological base of risk and safety.* Moscow: MGOF «Znanie», 2007:864. (In Russ.)
5. Il'ichev A.V. *Nachala sistemnoy bezopasnosti = Beginning of system security.* Moscow: Nauchnyy mir, 2003:456. (In Russ.)
6. Afanas'ev V.G. *Sistemnost' i obshchestvo = Systematicity and society.* Moscow: Politizdat, 1980:368. (In Russ.)
7. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd., ster. = Systems analysis: textbook for universities. The 2nd edition.* Moscow: Vyssh. shk., 2006:454. (In Russ.)
8. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V., Kireeva A.A. Risk analysis of document processes and systems. *Informatsiya – kommunikatsiya – dokument (IKD-2020): sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem) = Information - communication – document 2020: proceedings of the 1st All-Russian scientific and prac-*

- tical conference (with international participation)*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:22–27. (In Russ.)
9. Yankovaya V.F. Optimization of the organization's document flow. *Spravochnik sekretarya i ofis-menedzhera = Secretary and office manager handbook*. 2012;(5):35–41. (In Russ.)
 10. Pecherskiy A.V., Artyukhina E.O., Sviridova M.V., Chekovitova N.Yu. Application of cognitive analysis in the task of increasing the efficiency of document flow in an organization. *Sovremennye tekhnologii dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. st XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (13–14 aprelya 2011 g.) = Modern technologies of document management in business, production and management: proceedings of the 11th International scientific and practical conference (April 13-14, 2011)*. Penza: Izd-vo PGU, 2011:12–24. (In Russ.)
 11. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V., Kireeva A.A. Comparative scoring of the reliability of document systems and processes. *Sovremennye tekhnologii dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. nauch. st. po materialam XXI Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem) = Modern technologies of document management in business, production and management: proceedings of the 21st All-Russian scientific and practical conference (with international participation)*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:24–30. (In Russ.)
 12. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V., Kireeva A.A. Application of reliability models to assess risks of document processes and systems. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy: sb. st. po materialam VIII Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. = Information technologies in science and education. Problems and prospects: proceedings of the 8th All-Russian interuniversity scientific and practical conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:228–231. (In Russ.)
 13. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V. Application of models in problems of assessing the reliability of document processes and systems. *Informatsiya – kommunikatsiya – dokument (IKD-2021): sb. st. po materialam II Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem) = Information - communication – document 2020: proceedings of the 1st All-Russian scientific and practical conference (with international participation)*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:141–146. (In Russ.)
 14. Fionova L.R., Epishin I.G., Repin A.Yu. Analysis of life cycle risks of technological equipment for hazardous production objects during development of working design documentation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zave-deniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskoe nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2013;(3):176–188. (In Russ.)
 15. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V. Risk analysis of document processes using the example of the operational locomotive depot Penza. *Modernizatsionnye protsessy v sovremennoy Rossii: sb. st. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modernization processes in modern Russia: proceedings of the 5th International scientific and practical conference*. Penza, 2021:279–282. (In Russ.)
 16. Fionova L.R., Korovina L.V. Analysis of methods for optimizing preschool educational institution systems. *Sovremennye tekhnologii dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. st. XIV Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. = Modern technologies of document management in business, production and management: proceedings of the 14th International scientific and practical conference*. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2015:3–7. (In Russ.)
 17. Bakanova N.B. System of indicators of the state of document flow of the organization. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo = Proceedings of Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinskiy*. 2011;(26):529–533. (In Russ.)
 18. Pecherskiy A.V., Bakanova N.B., Fionova L.R. On the problem of risk analysis in technological systems of document support of management. *Sovremennye tekhnologii*

dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. st. po materialam XXIII Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem) = Modern technologies of document management in business, production and management: proceedings of the 23rd All-Russian scientific and practical conference (with international participation). Penza: Izd-vo PGU, 2023:150–155. (In Russ.)

19. Pecherskiy A.V., Dyatlov V.V. Application of models based on Markov analysis in problems of assessing the reliability of document processes and systems. *Sovremennye tekhnologii dokumentooborota v biznese, proizvodstve i upravlenii: sb. nauch. st. po materialam XXII Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhdunarodnym uchastiem) = Modern technologies of document management in business, production and management: proceedings of the 22nd All-Russian scientific and practical conference (with international participation).* Penza: Izd-vo PGU, 2022:136–140. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Наталья Борисовна Баканова

ведущий программист кафедры информационного обеспечения управления и производства, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dolcce@yandex.ru

Nataliya B. Bakanova

Leading programmer of the sub-department of information support for management and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анатолий Вадимович Печерский

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационного обеспечения управления и производства, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ura258@yandex.ru

Anatoliy V. Pecherskiy

Doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the sub-department of information support for management and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Людмила Римовна Фионова

доктор технических наук, профессор, декан факультета вычислительной техники, заведующий кафедрой информационного обеспечения управления и производства, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: lrfionova@mail.ru

Lyudmila R. Fionova

Doctor of engineering sciences, professor, dean of the faculty of computing technology, head of the sub-department of information support for management and production, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.04.2025

Принята к публикации / Accepted 22.05.2025

УДК 004.94

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-2

Концепции ведения силовых конкуренций специализированных систем и возможность их моделирования

М. Ю. Бабич¹, А. М. Бабич²

^{1,2}Научно-производственное предприятие «Рубин», Пенза, Россия

¹babichmj@mail.ru, ²fieryeye@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сложность проектирования и эксплуатации специализированных организационно-технических систем требует создания моделей их функционирования. Одной из проблем создания адекватных моделей является достаточно частая смена концепций силовых столкновений. Требуется рассмотреть принципы технологии, позволяющей адаптировать создаваемые модели к той или иной концепции. *Материалы и методы.* Путем введения специфических операций над системами и их элементами дается расширенное определение специализированных организационно-технических систем. Формализуются описания наиболее известных концепций и анализируются основные факторы, определяющие требования к технологии адаптации моделей к концепциям. *Результаты.* Приводится описание технологии, позволяющей объединить функции подсистемы управления, работу специального программного обеспечения и имитационную модель деятельности агентов специализированных систем. *Выводы.* Предлагаемая технология позволяет адаптировать разрабатываемые имитационные модели к описанным концепциям и дает возможность разрабатывать программное обеспечение имитационных моделей в процессе создания программного и информационного обеспечения специализированных систем.

Ключевые слова: силовая конкуренция, имитационное моделирование, сложная организационно-техническая система, технология моделирования

Для цитирования: Бабич М. Ю., Бабич А. М. Концепции ведения силовых конкуренций специализированных систем и возможность их моделирования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 12–28. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-2

Concepts of conducting power competitions of specialized systems and the possibility of their modeling

M.Yu. Babich¹, A.M. Babich²

^{1,2}Research and Production Enterprise “Rubin”, Penza, Russia

¹babichmj@mail.ru, ²fieryeye@yandex.ru

Abstract. *Background.* The complexity of designing and operating specialized organizational and technical systems requires the creation of models of their functioning. One of the problems in creating adequate models is the fairly frequent change of concepts of force collisions. It is necessary to consider the principles of technology that allows adapting the created models to one or another concept. *Materials and methods.* By introducing specific operations on systems and their elements, an expanded definition of specialized organizational and technical systems is given. Descriptions of the most well-known concepts are formalized and the main factors determining the requirements for the technology of adapt-

ing models to concepts are analyzed. *Results*. A description of the technology is given that allows combining the functions of the control subsystem, the operation of special software and a simulation model of the activity of agents of specialized systems. *Conclusions*. The proposed technology allows adapting the developed simulation models to the described concepts, and makes it possible to create software for simulation models in the process of creating software and information support for specialized systems.

Keywords: power competition, simulation modeling, complex organizational and technical system, modeling technology

For citation: Babich M.Yu., Babich A.M. Concepts of conducting power competitions of specialized systems and the possibility of their modeling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(2):12–28. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-2

Введение

Усложнение проектирования, разработки и управления сложными организационно-техническими системами (ОТС) требует создания моделей их функционирования. В настоящее время ведутся исследования в области ОТС по различным направлениям. Одно из них носит общий характер: обосновывается необходимость применения имитационных моделей ОТС, рассматриваются методические подходы построения комплекса моделей, предлагаются концепции их создания, теоретико-множественное описание и т.д. [1–3]. Изучение функционирования ОТС традиционно основывается на классическом и современном математическом аппарате. В процессе моделирования используются методы оптимизации [4], вероятностно-статистические методы [5–7]. При изучении специализированных ОТС применяются модели Ланчестера (1-го и 2-го рода), Краснощекова, основанные на решениях дифференциальных уравнений. Часто возникает неопределенность при отсутствии надежных статистических данных. В этом случае применяется аппарат нечеткой математики [8–10]. В моделировании сложных ОТС находят место элементы искусственного интеллекта, в частности нейросетевые технологии [11, 12]. Современным и интересным направлением является многоагентное моделирование [13–16]. В качестве агента, в зависимости от масштаба модели, можно принимать человека, группу людей, другие социальные общности или неодушевленные объекты (робот, БПЛА и т.д.). В ОТС управляющее воздействие происходит через людей, находящихся в контуре системы. Результаты действий зависят от их эмоционального состояния. Поэтому большое значение приобретают исследования возможности включения в процесс моделирования ОТС имитаций эмоций. В современных моделях широко используется архитектура *BDI* [17, 18], в основу которой положены ментальные составляющие: убеждение, желание, намерение. Другим направлением являются многомерные модели эмоций [19]. Современные эмоциональные модели основываются на нечеткой математике, нейронных сетях [20–22].

В работах [23, 24] были замечены возникающие проблемы, связанные с нахождением приемлемого математического аппарата. Как следствие, в [25] утверждается, что для кризисного периода работы ОТС исследования по управлению системами могут носить только фрагментарный характер, так как включают трудноразрешимые когнитивные и поведенческие задачи. Возникшую проблему пытаются решить путем отхода от жесткой формализации: метод сценирования Германа Кана, Форсайт-метод [26, 27], метод ситуаци-

онного анализа [28]. Неформальный интуитивный способ принятия решений рассматривается в [29].

Наиболее сложными для моделирования являются специализированные ОТС, участвующие в силовых столкновениях с конкурирующими ОТС, однако существуют известные проблемы [30]: ОТС являются нелинейными системами с активно взаимодействующими стоками и источниками энергии, функционирующими в условиях хаоса; информация, необходимая для управления ОТС в процессе их работы, является неточной, неполной, скрываемой конкурентом и объемной; на действия людей, находящихся в контуре ОТС, оказывает большое влияние их эмоциональное и ментальное состояния, которые вынуждают их совершать иррациональные действия. Решению вышеперечисленных проблем посвящен ряд работ [31–36]. Необходимо отметить дополнительную трудность, остающуюся вне рамок исследований: за последние 30 лет происходит сравнительно быстрая смена концепций силовых столкновений. Концепции меняются быстрее, чем модели ОТС, создающиеся под определенную логику управления столкновениями. Поэтому актуальными являются задачи, поставленные в настоящей работе:

1. Определить основные свойства специализированных ОТС, находящихся в конкуренции, и дать их расширенное определение, вводя специфические операции над системами, их элементами.
2. Проанализировать соответствие определения ОТС логике управления в известных концепциях силовых столкновений.
3. Предложить технологию и ее программно-информационную поддержку, базирующиеся на принципах, позволяющих создавать модели функционирования ОТС в рамках рассмотренных концепций.

Определение специализированной ОТС

Рассмотрим множество элементов E . Элементом e из E могут быть: человек, неживой объект (техническое устройство, дом, горючее и т.д.), человек, управляющий или использующий в своей деятельности неживой объект. Элемент множества, относящийся к человеку, будем называть агентом и обозначать через a , не относящийся – ресурсом и обозначать через b ; $e = \{a, b\}$. Каждый элемент множества, а также само множество в целом находятся в некотором состоянии, определяющемся набором атрибутов $\{Z^i\}_{i=1}^n$: технические характеристики, ментальные и эмоциональные состояния людей, координаты, время, объем и т.д. Через Z обозначим множество всех возможных состояний. Считаем, что множество динамично, т.е. состояние множества и его элементов зависит от времени.

Обозначим через R отношения между элементами или условия существования состояния из Z . Например, «человек1 опасается человека2» или «скорость не может превышать 100 км/ч».

Введем функции $F = (F_1, F_2, \dots, F_i)$. Функции могут быть инициированы элементами множества. Функция воздействует на элементы множества или на элементы другого множества. После ее завершения наблюдается изменение состояния элементов и множества.

Предназначением F является достижение поставленной конечной цели P за некоторый отрезок времени. Если P^i – подцель P , то существует последовательность (траектория)

$$P^1(t), P^2(t + \Delta t), \dots, P^m(t + m \times \Delta t), \quad (1)$$

завершение которой ведет к достижению конечной цели. Цель может быть составной и/или сложной, т.е. $P = p_1 \bullet p_2 \bullet \dots \bullet p_n$, где \bullet – знак конъюнкции или дизъюнкции; p_i – части цели. Если $h(P)$ – степень достижения цели, то $h(P) \in [0,1]$, где $h(P) = 1$ – полное достижение цели, после чего воздействия F завершаются. Достижение цели осуществляется действиями агентов, путем инициирования функций, но цель может быть поставлена всему множеству. В этом случае цель достигается после завершения совместных действий всех агентов.

Через G обозначим множество требований, приказов, указаний для агентов. Например: «достижение цели должно произойти в течение 5 ч». Если R – это существующие либо возможные условия или отношения, то G – требования к их выполнению.

Информацию о Z, R, F, P, G обозначим через I . К ней относятся: для Z – числовые и качественные характеристики текущего состояния множества, элементов; для R, P и G – описания отношений, условий, целей, приказов; для F – алгоритмы функций. Информацию о соответствующих множествах будем обозначать малыми латинскими буквами: $I = z \vee r \vee f \vee p \vee g$. Введенные Z, R, F, P, G, I могут относиться не только к элементам, но и ко всему множеству в целом; например, атрибут множества «все элементы в множестве». Если нет специального условия, то информация, соответствующая всему множеству, относится ко всем его элементам. Индекс e соответствует элементу, A (в дальнейшем S) – всему множеству, например, какое-либо требование g_A для всех элементов из A .

Совокупность (E, Z, R, F, P, G, I) будем обозначать через S и определим в качестве системы, т.е. как объективное единство (E, Z, R, F, P, G, I) закономерно связанных друг с другом предметов, явлений, людей, условий, а также знаний. Такое определение не противоречит традиционным определениям системы. Если (E, Z, R, F, P, G, I) – описание реальной системы, то $I = (z, r, f, p, g)$ – понятие системы, являющееся инструментом исследования.

В специализированных ОТС большое значение приобретает качество выполнения приказов, полученных комбатантом, поэтому необходимо каким-то образом учитывать степень желания их выполнения. Кроме того, должна существовать иерархия управления, поэтому введем дополнительные специфические операции.

Рассмотрим функцию передачи информации от одного элемента к другому: $a_1(I) \mapsto a_2$. Передача информации возможна между агентами или техническими устройствами. Например: $a_1(I(Z,P)) \mapsto a_2$ – передача информации о состоянии и цели агента a_1 . Предполагается, что если существует физическая реализация передачи \mapsto , то существуют соответствующие каналы связи или логистика. Если существует передача между системой и агентом $(\exists S_1 \mapsto a_2)$, то существует агент из S_1 , передающий информацию агенту a_2 . Аналогичны передачи между агентом и системой, системой и системой.

Определим отношение включения. Чтобы не путать с включением теоретико-множественным, будем обозначать его символами $\hat{\in}$ и $\hat{\subset}$:

- $b \in S$, если выполняются следующие условия: b из S ; существует агент из S , управляющий или использующий b ;
- $a \in S$, если выполняются условия: a из S ; агент знает об информации из g_S , относящейся к нему, и согласен в настоящее время (или такое согласие дано ранее) выполнять полученные приказы с определенной степенью желаний, т.е.

$$\exists z_a^y \in (0, 1], \quad (2)$$

где z_a^y – значение атрибута внутреннего состояния агента на выполнение приказа y из g ;

- $S_2 \hat{c} S_1$, если любой элемент из S_2 принадлежит S_1 и $\forall e: (e \in S_2) \Rightarrow (e \in S_1)$.

Можно доказать выполнение свойства транзитивности: $(S_1 \hat{c} S_2) \wedge (S_2 \hat{c} S) \Rightarrow (S_1 \hat{c} S)$. Предполагается, что указания g_{S_i}, g_S не противоречат друг другу, иначе агенту, включенному в S_1 , пришлось бы выполнять противоречивые указания, что является причиной иррационального поведения агента [37]. Согласие на выполнение приказа и получение приказа – необходимость выполнения приказа, но не означают обязательного его исполнения, например, отсутствие требуемых ресурсов или условий. Будем рассматривать только такие системы S , для которых любой элемент из S включен в S : $\forall e \in S \Rightarrow e \in S$.

Объединением \hat{c} систем S_1 и S_2 является система $S = S_1 \hat{c} S_2$, для которой выполняется следующее: элементами S будут считаться элементы, включенные (\hat{c}) в S_1 или в S_2 ; если элемент включен в S_1 или в S_2 , то элемент включен в S ; существует возможность передачи информации I между системами S_1 и S_2 .

Системы S_i назовем подсистемами S .

Пусть $S = (\hat{c}_{i=1}^n S_i) \hat{c} S^*$. Подсистему S^* назовем управляющей для S , если существует передача информации из S^* в части приказов, указаний в любую подсистему S_i , информация становится указанием (приказом) для всех агентов из S_i , т.е. $\forall i: (\exists S^*(I(g)) \mapsto S_i) \wedge (g = g_{S_i})$. Подсистема S^* оказывает управляющее воздействие через агентов подсистем S_i .

Систему S назовем ОТС, если в S существует подсистема управления (ПУ) S^* и реализуются введенные операции передачи информации, включения, объединения: $\mapsto, \hat{c}, \hat{c}, \hat{c}$. Заметим, подсистемы S_i могут обладать своими ПУ, т.е. возникает иерархия управления. Агенты, включенные в подсистемы, входят в контур управления системы.

Введем обозначение $X \sim (d)$: для X необходимо выполнение условия d . Например: $P_S \sim d$ – достижение цели при выполнении условия d , а $S_1(I(g(P_{S_2} \sim d))) \mapsto S_2$ означает передачу приказа об этом из ОТС S_1 в ОТС S_2 .

Через S' будем обозначать систему, аналогичную системе S , но конкурирующую с ней. Цели S и S' – несовместимы и противоположны. Это озна-

чает, что для любого момента времени выполняется $(P_S \neq P_{S'}) \wedge \wedge (h(P_S) + h(P_{S'}) \leq 1)$. Состояние системы, при котором достижение конечной цели невозможно ($h(P_S) \approx 0$), обозначим символом пустого множества \emptyset . Выполняется $P_S \sim (Z_{S'} = \emptyset)$. Системы S и S' назовем специализированными ОТС, находящимися в конкуренции.

Для агента атрибутом с индексом 1 (Z^1_a) будем обозначать особое, наиболее ценное состояние – жизнь агента, а его значение – через z^1_a .

Проанализируем три понятия: агент, система, суперсистема. Понятие агента как элемента системы является достаточно условным. В зависимости от масштаба задач в качестве агента можно принять человека, управляющего техническим устройством, группу людей, взвод, армию и т.д. Поэтому будем рассматривать агентов как простую ОТС $\{a\}$, не обладающую подсистемами, состоящую из одного элемента – самого агента. При нормальном состоянии психики агента выполняется условие рефлексивности для включения: $a \hat{c} \{a\}$. Множество систем, являющихся специализированными ОТС, ограничим сверху суперсистемами W . Суперсистем может быть несколько, но ОТС S может быть включена только в одну систему или суперсистему W_1 , и не существует другой суперсистемы W_2 , для которой $W_1 \hat{c} W_2$:

$$(\forall S, (\exists! W : S \hat{c} W) \wedge (\exists! S_k : S \hat{c} S_k)) \wedge (\exists W_m \neq W : (W_m \hat{c} W) \wedge (W \hat{c} W_m)). \quad (3)$$

Дополнительно введем обозначение U ; S – это система силовых, а U – гражданских структур.

Концепции силовых конкуренций и их описание

В начале XXI в. наблюдается интенсивное развитие силовых стратегий в рамках конвенционального вооружения. Возникают новые теории ведения военных столкновений. Причем наблюдается как смещение некоторых положений концепций, так и отказ от неудачных [38–42]. Выделим основные концепции ведения силовых конкуренций и приведем их описание в соответствии с введенным определением специализированной ОТС.

Конфликты низкой интенсивности. Традиционная межгосударственная война с применением обычных видов оружия завершит последнюю стадию своего развития. Останутся конфликты низкой интенсивности между различными организациями, не являющимися государствами.

Если W – государство, то

$$(P_S \sim Z_{S'} = \emptyset) \wedge (P_{S'} \sim Z_S = \emptyset) \wedge (z_S \ll z_W) \wedge \wedge (z_{S'} \ll z_{W'}) \wedge (S \hat{c} W) \wedge (S' \hat{c} W'). \quad (4)$$

Боевые стаи. Главными отличиями стаи являются централизованная стратегия и скоординированные действия, но одновременно децентрализованная тактика, аморфность, автономность. Стая состоит из кластера и подов. Три пода – кластер. Кластеры могут перетекать из одной организационной формы в другую.

Обозначим через T некоторый временной интервал, тогда

$$\exists T : (\forall t \in T \Rightarrow S(t) = \hat{c}_{i=1}^m S_i(t)) \wedge (\forall t \notin T \Rightarrow S_i(t) \hat{c} S(t)) \wedge$$

$$\wedge(S_i = \{S_{i_1}, S_{i_2}, S_{i_3}\}) \wedge (z(S_i) \ll z(S)). \quad (5)$$

Войны малых формирований – «Новые войны». Вместе с регулярными силами новые войны ведутся вместе с малыми формированиями. В отличие от вертикально организованного иерархического построения боевых единиц «старых войн» (регулярные силы), новые формирования представлены разнородным множеством групп, среди которых военизированные формирования, местные полевые командиры, криминальные банды, полицейские силы, группы наемников. Новые формирования сами обеспечивают себя ресурсами с помощью грабежа, захвата заложников, черного рынка или внешнего содействия.

Пусть $S_1 = \hat{\cup}_{i=1}^n S_i, S_2 = \hat{\cup}_{j=1}^m S_j$, тогда

$$(S = S_1 \hat{\cup} S_2) \wedge (\forall a \hat{\in} S_1 \Rightarrow a \hat{\notin} S_2) \wedge (\forall a \hat{\in} S_2 \Rightarrow a \hat{\notin} S_1) \wedge (\forall i, j: (z_{S_j} \ll z_{S_i}) \wedge \wedge(S_i \hat{\subset} W) \wedge (S_j \hat{\not\subset} W) \wedge (U_{S_j} = \emptyset) \wedge (P_S \sim Z_{S'} = \emptyset)). \quad (6)$$

Бесконтактные войны. Это войны с применением высокоточного оружия, используемого на межконтинентальной дальности для уничтожения экономики государства и органов управления:

$$P_{S'} \sim ((Z_{S^*} \approx \emptyset) \vee (Z_{W^*} \approx \emptyset) \vee (Z_U \approx \emptyset)) \wedge (z^2_{S'} > \rho), \quad (7)$$

где $z^2_{S'}$ – расстояние до конкурента; ρ – условное межконтинентальное расстояние.

Сетецентрические войны. Главной целью современных разработок для силовых структур является внедрение перспективных информационных технологий в военную сферу. По мнению отечественных специалистов [43], содержание предложенной концепции сетецентрических войн заключается не в новых формах и видах ведения военных действий, как пишут авторы концепции, а в изменении способа управления войсками (силами). Новый способ управления возможен при оптимизации состава, содержания, форм, сроков представления потоков информации на органах и пунктах управления, позволяющих проводить операции и боевые действия с помощью сетевых методов. При этом сохраняется классическая иерархическая система управления и соблюдается старый принцип реализации боевых задач. Результат достигается при создании единого информационного поля:

$$\exists j: P^j_S \sim (I(S) \mapsto S^*) \wedge (I(S') \mapsto S^*) \wedge (\forall S_i \hat{\subset} S \Rightarrow S^*(I(S, S', G) \mapsto S_i)). \quad (8)$$

Гибридные войны. Это войны, носящие мультимодальный характер, т.е. одновременное использование конвенциональных и неконвенциональных средств, симметричных и асимметричных тактик, регулярных и иррегулярных сил, применение кибероружия, информационных и дипломатических атак, вмешательство во внутреннюю политику, поддержка сепаратистских движений, криминальных и террористических группировок. Основным стратегическим преимуществом оказывается официальное непризнание государством, ведущим гибридные боевые действия, своего участия в войне.

Гибридные войны лишь частично поддаются моделированию, так как имитировать в одной модели силовые функции и, например, информационные, дипломатические действия и т.д. практически невозможно. Пусть W – государство, S и U – его военные и гражданские подсистемы. Формально к ним можно отнести (4)–(6) и дополнительно:

$$(W = (\hat{\cup}_{i=1}^n S_i) \hat{\cup} (\hat{\cup}_{j=1}^m U_j) \wedge (\hat{\cup}_{k=1}^l S'_k \hat{=} W')) \wedge (W(I(G_W, P_W)) \mapsto \hat{\cup}_{k=1}^l S'_k) \wedge \wedge (P_W \sim Z_{W'} = \emptyset) \wedge (P_{S'} \sim Z_{W'} = \emptyset). \quad (9)$$

Нелинейность столкновений. Войны ведутся открытыми и нелинейными системами, функционирующими в условиях хаоса.

Покажем, что если $W = (\hat{\cup}_{i=1}^n S_i) \hat{\cup} (\hat{\cup}_{j=1}^m U_j)$, то ОТС S являются нелинейными, открытыми и неравновесными. ОТС S нелинейна, так как имеют место выбор, многовариантность, необратимость траекторий достижения целей и периодичность чередований [30]. Открытая система – система, которая непрерывно взаимодействует со своей средой. Взаимодействие может принимать форму передачи информации, энергии, материальных ресурсов. Для S источники энергии порождаются суперсистемой W . Это системы U , поставляющие материальные, людские, информационные ресурсы. Стоки энергии для S – это конкурирующая система S' . В силовых столкновениях с S' у S сокращаются численность агентов и ее ресурсы. Если источники и стоки активны, но их активность и значимость примерно равны, то ОТС переходят в очень неустойчивый режим, т.е. имеет место чувствительность к малым возмущениям, приводящим к резкому изменению состояния систем. Это функционирование системы в условиях хаоса.

Старые стратегии, но используемые в локальных конфликтах. Разгром противника в генеральном сражении:

$$(P_S \sim Z_{S'} = \emptyset) \wedge (h(P_S) = 1) \Rightarrow (Z_{W'} = \emptyset).$$

Сокрушительные удары по флангам, обход противника с тыла:

$$\exists i : (P_S \sim Z_{S'_i} = \emptyset) \wedge (S' = \cup_{i=1}^n S'_i) \wedge (h(P_S) = 1 \Rightarrow Z_{S'} = \emptyset),$$

где S'_i могут быть флангами, тылом и т.д.

Разведывательная функция БПЛА [44]. Рассмотрим $S^k = \{b_i\}_{i=1}^n$ и $\forall b_i \in S^k$. По определению $z^1_b = 0$. Разведывательная функция БПЛА определяется как

$$(S^k \hat{=} S) \wedge (\exists I(S') \mapsto b_i \mapsto S^*) \wedge (S^*(I(g)) \mapsto b_i). \quad (10)$$

Влияние гибридных войн на ведение конкурентных действий можно имитировать изменением состояний и иррациональными действиями агентов специализированных ОТС. Введем аксиому [37]: агент как примитивная система, в отличие от обычных систем, всегда включен не менее чем в две ОТС, не являющиеся подсистемами друг друга, цели которых не совпадают, т.е. для агента вместо (3) получаем

$$\begin{aligned} \forall a : (\exists S_1) \wedge (\exists S_2) \wedge (a \in S_1) \wedge (a \in S_2) \wedge (S_1 \neq S_2) \wedge \\ \wedge (S_1 \hat{c} S_2) \wedge (S_2 \hat{c} S_1) \wedge (P_{S_1} \neq P_{S_2}). \end{aligned} \quad (11)$$

Приведем пример выполнения аксиомы: комбатант принадлежит своему вооруженному отряду и семье, состояние которой влияет на его эмоциональность. Цели семьи не совпадают с целями отряда. В процессе гибридной войны многие подсистемы, в которые включен агент, подвергаются воздействию конкурирующих суперсистем. Несовпадение их целей приводит к тому, что и у агента появляются две несовпадающие цели, которые невозможно достичь одновременно. Агенту остается выбрать достижение одной цели, например P_{S_1} , в ущерб подсистеме S_2 , т.е. для S_1 $z^y_a \approx 1$, а для S_2 $z^y_a \approx 0$. В этом случае по отношению к управляющей подсистеме в S_2 агент ведет себя иррационально.

Ракетный комплекс «Орешиник» можно отнести к оружию большой мощности бесконтактных войн шестого поколения [45].

Ядерная составляющая вооруженной конкуренции в работе не рассматривалась, так как ядерный конфликт не может быть управляемым.

Технология и ее программная поддержка

Выше удалось формализовать условия наиболее известных концепций. Невозможно спроектировать программное обеспечение (ПО), моделирующее все виды конкурентных столкновения. Тем не менее опишем основные принципы технологии и поддерживающее ее ПО, претендующие на адаптацию к приведенным концепциям.

В описании концепций приведенные логические связи и кванторы $\wedge, \vee, \Rightarrow, \exists, \forall$ определяют структуру и логику функционирования специализированных ОТС, зависящих от конкретных задач и целей. В обязательном порядке присутствуют введенные специфические операции: включение \hat{c} и объединение $\hat{\cup}$. Их определение базируется на понятии включения агентов в состав ОТС: $a \in S$. Деятельность агентов по управлению системой и исполнению приказов ведет к изменению состояний ОТС.

Введем три основных фактора, определяющих требования к модели.

Первый фактор. Меняются акторы, системы, логика конкурентной борьбы и т.д. Остается неизменным наличие ПУ S^* , которая определяет введенные операции включения. ПУ S^* может состоять из группы агентов или из одного агента, рассматриваемого в качестве примитивной системы без деления на подсистемы.

Второй фактор. Чем выше в иерархии подчинения находится ПУ, тем более необходимо наличие в ней специального программного обеспечения (СПО), выполняющего функции поддержки принятия решений, или его макетов, если рассматривается период создания СПО. СПО поддерживает деятельность агентов a^* , включенных в S^* ($a^* \in S^*$), по оценке сложившейся обстановки. На основе решений ПУ и приказов суперсистемы W происходит планирование траектории (1), т.е. создание приказов G .

Третий фактор. Действия агентов a^{**} вне S^* , т.е. ($a^{**} \notin S^*$) \wedge $(\exists S_i \neq S^* : a^{**} \in S_i \hat{c} S)$, происходят в рамках поставленной задачи (цели) –

переданного приказа $g \in G$. Необходимо учитывать результаты попыток агентов a^{**} достижения поставленной цели. Во внешней среде ОТС существует конкурирующая ОТС S' . Ее планы не известны, но создаваемая текущая обстановка, оцениваемая ПУ, является следствием деятельности агентов, включенных в S' . Сложность заключается в создании адекватной модели функционирования агентов в условиях хаоса. Кроме того, трудно формализовать умение и желание выполнения приказов (значение z^y_a), являющихся следствиями: знаний, эмоций (например, страх, уверенность), аксиомы (11) и т.д.

Исходя из основных факторов к использованию предлагается технология [46], интегрирующая функции ПУ S^* и деятельность должностных лиц (ДЛ) в ПУ, разработанное или разрабатываемое СПО (ее макеты), с которым работают ДЛ ПУ, с программами имитации (ПИ), моделирующие варианты возможных ситуаций как следствия деятельности агентов конкурирующих систем, находящихся вне ПУ.

В процессе моделирования осуществляется принятие решений ДЛ в ПУ (агенты a^*), которое является следствием имитируемой полученной информации о текущей ситуации, приказов суперсистемы, взаимодействия ДЛ с СПО, поддерживающим их работу, регламентирующих инструкций работы с СПО. В ПУ ведется база данных прецедентов, куда заносится информация о состоянии ОТС S , S' и принятых решениях ДЛ в ПУ.

ПИ имитируют действия агентов a^{**} из S и S' , изменения обстановки, передачу информации о текущей обстановке в ПУ и приказов агентам a из ПУ.

В зависимости от возможности адекватно формализовать процессы, протекающие при функционировании специализированных ОТС, имитация деятельности агентов из S' и S управляется ДЛ (условно – тестеры), принимающими участие в моделировании, или происходит автоматически по подготовленным сценариям. Участие в моделировании людей в процессе принятия решений в ПУ и при управлении непосредственно функциями своих агентов и агентов противника расширяет возможности модели. Человек неожиданными иррациональными действиями может смоделировать условия хаоса или действия агентов при различных значениях z^y_a .

Таким образом, работу интегрированного программного обеспечения осуществляют ДЛ, принимающие те или иные решения в ПУ, а также тестеры, управляющие агентами при моделировании. Возникают игровые ситуации между ДЛ и тестерами, отвечающими за функционирование системы S , и тестерами, имитирующими работу агентов системы S' . Заметим, для упрощения процесса имитации функции ПУ ОТС S' не моделируются. Результаты принятых решений можно проанализировать с помощью базы данных прецедентов.

Вариантом программной поддержки технологии, точнее ПИ, могут быть программные комплексы проектирования имитационных многоагентных моделей. Применение варианта связано с использованием программ, обеспечивающих запуск агентов, коммуникацию между ними, организацию доступа к ресурсам. Среди таких инструментов наиболее известны *Anylogic*, *Jade*, *Gamma*, *Netlogo*, *Repast Symphony* и др. К сожалению, перечисленные ин-

струменты навязывают разработчику свою идеологию: архитектурный подход, сервисы, готовые решения и т.д. Другой вариант – разработка ядра, т.е. библиотеки, содержащей программы из состава ПИ, и их информационного обеспечения (ИО), т.е. наиболее общих программ и таблиц, используемых при создании имитационных многоагентных моделей. Для агентов в любой концепции остаются неизменными следующие функции: разрушение, перемещение, передача информации, траты и приобретения ресурсов для названных функций. Ядро ПИ и ИО предлагается создать в виде шаблонов. Ядро ПИ включает или дополняется функциями из набора F . ИО содержит информацию из I , а также общие таблицы из баз данных разработки СПО и ПИ. В ИО включается онтология технологии, а в ПИ – ее программная поддержка [47]. Это позволяет пользователям технологии соблюдать принципы технологии и одновременно выполнять техническое задание заказчика на разрабатываемую систему, в частности на СПО.

Частично ядро было разработано и использовано при создании системы защиты особо важных объектов. В частности, для защиты от БПЛА разрабатываемая система описывалась как

$$(S' = \{b_i\}_{i=1}^n) \wedge (\forall b_i \in S') \wedge (P_{S'} \sim Z_S = \emptyset) \wedge (S = \hat{\cup}_{j=1}^k S_k) \wedge (\forall j : \exists ! a \in S^*_j) \wedge \wedge (I(S') \mapsto S^*) \wedge (P_S \sim Z_{S'} = \emptyset). \quad (12)$$

Заключение

Предложенная технология объединяет СПО системы и ПИ интегрирует орган управления, т.е. введенные операции включения и объединения, участвующие во всех описаниях концепций вооруженной конкуренции, деятельность ДЛ, оценивающих возникшую обстановку и управляющих специализированной ОТС, имитацию действия своих агентов и агентов конкурента (автоматически или под управлением тестеров), имитацию смены состояний ОТС и окружающей среды, передачу информации в ПУ и из нее. Обобщения, использованные в технологии, и ее программная поддержка позволяют адаптировать разработку ПИ к приведенным концепциям, проводить работы по моделированию ОТС в процессе создания программного и информационного обеспечения СПО. Благодаря этому можно оценить эффективность всей ОТС до ее введения в эксплуатацию, а также прогнозировать развитие текущей или предполагаемой ситуации как возможный результат действия конкурентов на принятые управляющие воздействия из ПУ.

Список литературы

1. Соловьёв И. В. Проблемы исследования сложной организационно-технической системы // Вестник МГТУ МИРЭА. 2013. № 1 (1) С. 20–40.
2. Чумичкин А. А. Моделирование автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими системами // i-methods. 2020. Т. 12, № 1. URL: <http://intech-spb.com/i-methods/> (дата обращения: 30.03.2025).
3. Бродский Ю. И., Лебедев В. Ю., Огарышев В. Ф., Павловский Ю. Н., Савин Г. И. Общие проблемы моделирования сложных организационно-технических систем. URL: <https://ras.ru>ph>2H0UZEKI.pdf> (дата обращения: 18.04.2025).
4. Бекетов С. М., Зубкова Д. А., Редько С. Г. Сравнение методов оптимизации в имитационных моделях сложных организационно-технических систем // Моде-

- лирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. № 12 (3). С. 1–12. doi: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027 URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1665> (дата обращения: 30.03.2025).
5. Костогрызов А. И. Нистратов А. А. Методические положения по вероятностному прогнозированию качества функционирования систем // Правовая информатика. 2024. № 3. С. 13–31.
 6. Прозоров Д. Е., Плетнёв К. Е., Яшина А. Г. Апостериорная оценка состояний многосвязной цепи Маркова // Информация и космос. 2016. № 1. С. 46–53.
 7. Железняков А. О., Жилин Р. А. Моделирование процессов функционирования организационно-технической системы на основе марковских случайных процессов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51, № 4. С. 71–77.
 8. Басков О. В., Ногин В. Д. Нечеткие множества второго порядка и их применение в принятии решений. Общие понятия // Искусственный интеллект и принятие решений. 2021. № 1. С. 3–14.
 9. Гусейнзаде Ш. С. Моделирование интеллектуальных систем управления с применением модифицированных нечетких раскрашенных сетей Петри // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Т. 17, № 10. С. 30–37.
 10. Hans P. Geering. Introduction to Fuzzy Control. URL: <https://www.researchgate.net/publication/259197110> (дата обращения: 30.03.2025).
 11. Замятин Н. В., Медянцеv Д. В. Методика нейросетевого моделирования сложных систем // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 8. С. 100–106.
 12. Шолохова А. А., Иванов А. Н. Моделирование динамических систем на основе полиномиальных нейронных сетей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2017. № 4 (19). URL: <http://moit.vivt.ru/> (дата обращения: 30.03.2025).
 13. Городецкий В. И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта. 1996. № 1. С. 44–59.
 14. Мелехин В. Б., Хачумов М. В. Планирование коллективной деятельности автономных интеллектуальных агентов в условиях неопределенности // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 4. С. 101–113.
 15. Симанков В. С., Дубенко Ю. В. Системный анализ в иерархических интеллектуальных многоагентных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18, № 3. С. 33–46. doi: 10.14489/vkit.2021.03.pp.033-046
 16. Листопад С. В. Характеристики и логическая структура методологии построения рефлексивно-активных систем искусственных гетерогенных интеллектуальных агентов // Системы и средства информатики. 2023. Т. 33, № 4. С. 18–27.
 17. Michael E. Bratman. Intentions, Plans, and Practical Reason. Harvard University Press, 1987. 224 p.
 18. Hanen Lejmi-Riahi, Fahem Kebair, Lamjed Ben Said. Agent Decision-Making under Uncertainty: Towards a New E-BDI Agent Architecture Based on Immediate and Expected Emotions // International Journal of Computer Theory and Engineering. 2014. Vol. 6, № 3. P. 254–259.
 19. Russell J. A. A Circumflex Model of Affect // Journal of Personality and Social Psychology. 1980. Vol 39, № 6. P. 1161–1178.
 20. Charalampos Karyotisb, Faiyaz Doctorb, Rahat Iqbalb, Anne Jamesb, Victor Changa. A fuzzy computational model of emotion for cloud based sentiment analysis. URL: https://pure.coventry.ac.uk/ws/portalfiles/portal/13277719/1_s2.0_S0020025517304164_main.pdf (дата обращения: 02.05.2024).
 21. Chie Hieida, Takato Horii, Takayuki Nagai. Deep Emotion: A Computational Model of Emotion Using Deep Neural Networks. URL: <https://arxiv.org/pdf/1808.08447.pdf> (дата обращения: 02.05.2024).

22. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Бабич А. М. Эмоциональные агенты в моделировании функционирования сложных организационно-технических систем (часть I) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 28–38. doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-3
23. Красовский А. А. Проблемы физической теории управления // Автоматика и телемеханика. 1990. № 11. С. 3–28.
24. Филимонов Н. Б. Методологический кризис «всепобеждающей математизации» современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 291–299.
25. Bundy J., Michael D. Pfarrer, Cole E. Short, W. Timothy Coombs. Crises and Crisis Management: Integration, Interpretation, and Research Development // Journal of Management. 2017. Vol. 43, № 6. P. 1661–1692.
26. Воробьев И. Н. Еще раз о военной футурологии // Военная мысль. 2020. № 5. С. 51–57.
27. Коржевский А. С., Махнин В. Л. Методологические подходы к прогнозированию в сфере военной безопасности государства // Военная мысль. 2022. № 5. С. 21–31.
28. Барановский В. Г., Кобринская И. Я., Уткин С. В., Фрумкин Б. Е. Метод ситуационного анализа как инструмент актуального прогнозирования в условиях трансформации миропорядка // Вестник МГИМО-Университета. 2019. № 12 (4). С. 7–23.
29. Mohammed Ali, Trevor Wood-Harper. Artificial Intelligence (AI) as a Decision-Making Tool to Control Crisis Situations. URL: https://www.researchgate.net/publication/358754137_Artificial_Intelligence_AI_as_a_Decision-Making_Tool_to_Control_Crisis_Situations (дата обращения: 03.08.2024).
30. Бабич М. Ю., Бабич А. М. Нелинейность, иррациональность, эмоциональные состояния в сложных специализированных системах // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : по материалам XXIV Международ. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2024. С. 3–10.
31. Вдовин А. В., Костин К. К. Технология искусственного интеллекта в системах поддержки принятия решений – вероятные подходы и пути реализации // Вестник академии военных наук. 2022. № 4 (81). С. 91–97.
32. Саяпин О. В., Тиханыхев О. В., Безвесильная А. А., Чискидов С. В. Об одной тенденции развития алгоритмов, реализуемых в системах поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36, № 3. С. 388–397. doi: 10.15827/0236-235X.142.388–397
33. Масленников О. В., Алиев Ф. К., Беспалов С. А., Митрошин Е. С. О вычислительной сложности современных военных задач // Военная мысль. 2023. № 2. С. 72–85.
34. Ишечкин Б. Б., Ишечкин И. Б., Евтихов С. В. Перспективы применения искусственного интеллекта в управлении войсками // Военная мысль. 2023. № 8. С. 79–84.
35. Прокаев А. Н., Шабунин А. А. Отечественный и зарубежный опыт количественного обоснования решений в области применения сил (войск) флота // Военная мысль. 2024. № 2. С. 77–91.
36. Чуркин И. П. Методологический анализ роли математического моделирования при принятии решений на вооруженную борьбу в воздушной сфере // Военная мысль. 2022. № 6. С. 53–60.
37. Бабич М. Ю., Бабич А. М. Влияние аксиом принадлежности агентов нескольким организационно-техническим системам на рациональное поведение агентов // Искусственные общества. 2021. Т. 16, № 1. doi: 10.18254/S207751800013885-2 URL: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (дата обращения: 30.01.2025).
38. Уланов А. С. Прогностическая оценка тенденций развития средств вооруженной борьбы и способов их применения в войнах будущего // Военная мысль. 2022. № 8. С. 37–50.

39. Смоловой А. В. Военные конфликты будущего: современный взгляд // Вестник академии военных наук. 2022. № 3 (80). С. 80–87.
40. Мальшев А. И., Мардусин В. Н., Хахалев В. Ю. Анализ трансформации основных категорий военной конфликтологии в доктринальных основах РФ // Военная мысль. 2023. № 8. С. 6–15.
41. Бартош А. А. Модели эскалации современных военных конфликтов // Военная мысль. 2024. № 1. С. 22–36.
42. Таненя О. С., Вдовин А. В. Трансформация вооруженного противоборства: обусловленность новой тенденции военного искусства // Военная мысль. 2024. № 3. С. 38–45.
43. Кондратьев А. Е. Общая характеристика сетевых архитектур, применяемых при реализации перспективных сетецентрических концепций ведущих зарубежных стран // Военная мысль. 2008. № 12. С. 63–74.
44. Поляков И. В. Обоснование требований к робототехническим комплексам, предназначенным для ведения инженерной разведки // Вестник академии военных наук. 2021. № 1 (74). С. 103–108.
45. Половинкин В. Первым зацветает «Орешник» // Защита и безопасность. 2024. Т. 4. С. 3–5.
46. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Бабич А. М. Имитация особенностей автоматизированных систем управления для силовых структур в процессе моделирования их функционирования // i-methods. 2022. Т. 14, № 4. URL: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/4/1-babich4-2022.pdf> (дата обращения: 07.02.2025).
47. Бабич М. Ю., Кузнецов В. Е., Чигирев М. А., Ползунов Н. В. Онтология технологии включения метода сценарирования в функционирование специализированных конкурирующих систем // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12, № 4 (64). С. 12–18.

References

1. Solov'ev I.V. Issues of research of complex organizational and technical system. *Vestnik MGTU MIREA = Bulletin of MIREA – Russian Technological University*. 2013;(1):20–40. (In Russ.)
2. Chumichkin A.A. Modeling of automated control systems for complex organizational and technical systems. *i-methods*. 2020;12(1). (In Russ.). Available at: <http://intech-spb.com/i-methods/> (accessed 30.03.2025).
3. Brodskiy Yu.I., Lebedev V.Yu., Ogaryshev V.F., Pavlovskiy Yu.N., Savin G.I. *Obshchie problemy modelirovaniya slozhnykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistem = General problems of modeling complex organizational and technical systems*. Available at: <https://ras.ru>ph> 2H0UZEKI.pdf> (accessed 18.04.2025).
4. Beketov S.M., Zubkova D.A., Red'ko S.G. Comparison of optimization methods in simulation models of complex organizational and technical systems. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2024;(12):1–12. (In Russ.). doi: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.027 Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1665> (accessed 30.03.2025).
5. Kostogryzov A.I. Nistratov A.A. Methodological provisions for probabilistic forecasting of the quality of functioning of systems. *Pravovaya informatika = Legal informatics*. 2024;(3):13–31. (In Russ.)
6. Prozorov D.E., Pletnev K.E., Yashina A.G. A posteriori estimation of states of a multiply connected Markov chain. *Informatsiya i kosmos = Information and space*. 2016;(1):46–53. (In Russ.)
7. Zheleznyakov A.O., Zhilin R.A. Modeling of the functioning processes of an organizational and technical system based on Markov random processes. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Dagestan State Technical University. Engineering sciences*. 2024;51(4):71–77. (In Russ.)

8. Baskov O.V., Nogin V.D. Second-order fuzzy sets and their application in decision making. General concepts. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision making*. 2021;(1):3–14. (In Russ.)
9. Guseynzade Sh.S. Modeling of intelligent control systems using modified fuzzy colored Petri nets. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of computer and information technologies*. 2020;17(10):30–37. (In Russ.)
10. Hans P. *Geering. Introduction to Fuzzy Control*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259197110> (accessed 30.03.2025).
11. Zamyatin N.V., Medyantsev D.V. Methodology of neural network modeling of complex systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2006;309(8):100–106. (In Russ.)
12. Sholokhova A.A., Ivanov A.N. Modeling of dynamic systems based on polynomial neural networks. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. Nauchnyy zhurnal = Modeling, optimization and information technology. Scientific journal*. 2017;(4). (In Russ.). Available at: <http://moit.vivt.ru/> (accessed 30.03.2025).
13. Gorodetskiy V.I. Multi-agent systems: current state of research and application prospects. *Novosti iskusstvennogo intellekta = Artificial intelligence news*. 1996;(1):44–59. (In Russ.)
14. Melekhin V.B., Khachumov M.V. Planning collective activities of autonomous intelligent agents under uncertainty. *Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy = Artificial intelligence and decision making*. 2020;(4):101–113. (In Russ.)
15. Simankov V.S., Dubenko Yu.V. Systems analysis in hierarchical intelligent multi-agent systems. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Bulletin of computer and information technologies*. 2021;18(3):33–46. (In Russ.). doi: 10.14489/vkit.2021.03.pp.033-046
16. Listopad S.V. Characteristics and logical structure of the methodology for constructing reflexive-active systems of artificial heterogeneous intelligent agents. *Sistemy i sredstva informatiki = Computer science systems and tools*. 2023;33(4):18–27. (In Russ.)
17. Michael E. Bratman. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987:224.
18. Hanen Lejmi-Riahi, Fahem Kebair, Lamjed Ben Said. Agent Decision-Making under Uncertainty: Towards a New E-BDI Agent Architecture Based on Immediate and Expected Emotions. *International Journal of Computer Theory and Engineering*. 2014;6(3):254–259.
19. Russell J.A. A Circumflex Model of Affect. *Journal of Personality and Social Psychology*. 1980;39(6):1161–1178.
20. Charalampos Karyotisb, Faiyaz Doctorb, Rahat Iqbalb, Anne Jamesb, Victor Changa. *A fuzzy computational model of emotion for cloud based sentiment analysis*. Available at: https://pure.coventry.ac.uk/ws/portalfiles/portal/13277719/1_s2.0_S0020025517304164_main.pdf (accessed 02.05.2024).
21. Chie Hieida, Takato Horii, Takayuki Nagai. *Deep Emotion: A Computational Model of Emotion Using Deep Neural Networks*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1808.08447.pdf> (accessed 02.05.2024).
22. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Chigirev M.A., Babich A.M. Emotional agents in modeling the functioning of complex organizational and technical systems (part 1). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):28–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-4-3
23. Krasovskiy A.A. Issues of physical control theory. *Avtomatika i telemekhanika = Automation and telemechanics*. 1990;(11):3–28. (In Russ.)
24. Filimonov N.B. The methodological crisis of the “all-conquering mathematization” of modern management theory. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*. 2016;17(5):291–299. (In Russ.)

25. Bundy J., Michael D. Pfarrer, Cole E. Short, W. Timothy Coombs. Crises and Crisis Management: Integration, Interpretation, and Research Development. *Journal of Management*. 2017;43(6):1661–1692.
26. Vorob'ev I.N. Once again about military futurology. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2020;(5):51–57. (In Russ.)
27. Korzhevskiy A.S., Makhnin V.L. Methodological approaches to forecasting in the sphere of military security of the state. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2022;(5):21–31. (In Russ.)
28. Baranovskiy V.G., Kobrinskaya I.Ya., Utkin S.V., Frumkin B.E. The method of situational analysis as a tool for current forecasting in the conditions of transformation of the world order. *Vestnik MGIMO-Universiteta = Bulletin of MGIMO University*. 2019;(12):7–23. (In Russ.)
29. Mohammed Ali, Trevor Wood-Harper. *Artificial Intelligence (AI) as a Decision-Making Tool to Control Crisis Situations*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/358754137_Artificial_Intelligence_AI_as_a_Decision-Making_Tool_to_Control_Crisis_Situations (accessed 03.08.2024).
30. Babich M.Yu., Babich A.M. Nonlinearity, irrationality, emotional states in complex specialized systems. *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: po materialam XXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Issues of informatics in education, management, economics and technology: proceedings of the 24th International scientific and engineering conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2024:3–10. (In Russ.)
31. Vdovin A.V., Kostin K.K. Artificial intelligence technology in decision support systems – possible approaches and implementation paths. *Vestnik akademii voennykh nauk = Bulletin of the Academy of Military Sciences*. 2022;(4):91–97. (In Russ.)
32. Sayapin O.V., Tikhanychev O.V., Bezvesil'naya A.A., Chiskidov S.V. On one trend in the development of algorithms implemented in decision support systems. *Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems*. 2023;36(3):388–397. (In Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.388–397
33. Maslennikov O.V., Aliev F.K., Bepalov S.A., Mitroshin E.S. On the computational complexity of modern military tasks. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2023;(2):72–85. (In Russ.)
34. Ishechkin B.B., Ishechkin I.B., Evtikhov S.V. Prospects for the application of artificial intelligence in troop management. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2023;(8):79–84. (In Russ.)
35. Prokaev A.N., Shabunin A.A. Domestic and foreign experience in quantitative justification of decisions in the field of application of naval forces (troops). *Voennaya mysl' = Military thought*. 2024;(2):77–91. (In Russ.)
36. Churkin I.P. Methodological analysis of the role of mathematical modeling in decision-making on armed struggle in the air sphere. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2022;(6):53–60. (In Russ.)
37. Babich M.Yu., Babich A.M. The influence of axioms of belonging of agents to several organizational and technical systems on the rational behavior of agents. *Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies*. 2021;16(1). doi: 10.18254/S207751800013885-2 Available at: <https://artsoc.jes.su/S207751800013885-2-1> (accessed 30.01.2025).
38. Ulanov A.S. Predictive assessment of trends in the development of means of armed struggle and methods of their application in future wars. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2022;(8):37–50. (In Russ.)
39. Smolovoy A.V. Military conflicts of the future: a modern view. *Vestnik akademii voennykh nauk = Bulletin of the Academy of Military Sciences*. 2022;(3):S. 80–87. (In Russ.)
40. Malyshev A.I., Mardusin V.N., Khakhalev V.Yu. Analysis of the transformation of the main categories of military conflictology in the doctrinal foundations of the Russian Federation. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2023;(8):6–15. (In Russ.)
41. Bartosh A.A. Escalation patterns of modern military conflicts. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2024;(1):22–36. (In Russ.)

42. Tanenya O.S., Vdovin A.V. Transformation of armed confrontation: the conditionality of a new trend in military art. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2024;(3):38–45. (In Russ.)
43. Kondrat'ev A.E. General characteristics of network architectures used in the implementation of promising network-centric concepts of leading foreign countries. *Voennaya mysl' = Military thought*. 2008;(12):63–74. (In Russ.)
44. Polyakov I.V. Justification of requirements for robotic systems intended for engineering reconnaissance. *Vestnik akademii voennykh nauk = Bulletin of the Academy of Military Sciences*. 2021;(1):103–108. (In Russ.)
45. Polovinkin V. The first to bloom is “Oreshnik”. *Zashchita i bezopasnost' = Security and safety*. 2024;4:3–5. (In Russ.)
46. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Babich A.M. Simulation of the features of automated control systems for law enforcement agencies in the process of modeling their functioning. *i-methods*. 2022;14(4). Available at: <http://intech-spb.com/wp-content/uploads/archive/2022/4/1-babich4-2022.pdf> (accessed 07.02.2025).
47. Babich M.Yu., Kuznetsov V.E., Chigirev M.A., Polzunov N.V. Ontology of technology for including the method of staging into the functioning of specialized competing systems. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = The 21st century: results of the past and problems of the present plus*. 2023;12(4):12–18. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Юрьевич Бабич

доктор технических наук, доцент,
главный специалист научно-
технического центра, Научно-
производственное предприятие
«Рубин» (Россия, Пенза,
ул. Байдукова, 2)

E-mail: babichmj@mail.ru

Mikhail Yu. Babich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, key specialist of the Scientific
and Technical Center, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Андрей Михайлович Бабич

кандидат технических наук, программист
научно-технического центра,
Научно-производственное
предприятие «Рубин» (Россия,
Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: fieryeye@yandex.ru

Andrey M. Babich

Candidate of engineering sciences,
software engineer of the Scientific
and Technical Center, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.05.2025

Принята к публикации / Accepted 10.06.2025

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

УДК 621.3.091.22

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Исследование фрактальных патч-антенн в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот

Р. А. Браже¹, Е. Ю. Лебедев²

^{1,2}Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В последние годы наблюдается информационный бум вокруг фрактальных антенн, предназначенных для систем беспроводной связи на самых разных частотах. Однако среди специалистов пока нет однозначного мнения о том, обладают ли такие антенны лучшими характеристиками, чем обычные, канонические антенны. В связи с этим целью настоящей статьи является исследование фрактальных патч-антенн в представляющих наибольший практический интерес современных системах связи на гигагерцовых и терагерцовых частотах. *Материалы и методы.* Рассматриваются две одинаковые по форме монополярные фрактальные патч-антенны типа «ковёр Серпинского»: гигагерцовая и терагерцовая. Исследуются следующие характеристики обеих антенн: частотные зависимости матрицы рассеяния, коэффициент стоячей волны напряжения, входного сопротивления и диаграммы направленности. Принимается во внимание, что в терагерцовом диапазоне приходится учитывать факт возбуждения в патче плазмон-поляритонов, обладающих сильно выраженными дисперсионными свойствами. Моделирование осуществлялось в программе CST Microwave Studio отдельно для исходной треугольной канонической антенны и трех ее фрактальных итераций. *Результаты.* Показано, что фрактализация электромагнитной гигагерцовой антенны не дает ощутимых преимуществ по сравнению с исходной нефрактальной антенной ни по количеству рабочих частот, ни по качеству диаграммы направленности, а по ряду параметров эта фрактализация даже ухудшает ситуацию. Напротив, в случае плазмон-поляритонной терагерцовой антенны вследствие дисперсионных свойств плазмон-поляритонов удается повысить и количество полос пропускания антенны, и интенсивность главного лепестка диаграммы направленности, и его угловую ширину. *Выводы.* Часто рекламируемые преимущества фрактальных антенн на частотах вплоть до гигагерцовых на деле являются лишь данью моде. В то же время в случае плазмон-поляритонных антенн терагерцового диапазона их фрактализация позволяет реализовать новые возможности в смысле многополосности и эффективности управления характеристиками.

Ключевые слова: фрактальные патч-антенны, гигагерцы, терагерцы, характеристики, эффективность

Для цитирования: Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Исследование фрактальных патч-антенн в гигагерцовом и терагерцовом диапазонах частот // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 29–40. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Studying the fractal patch antennas in the gigahertz and terahertz frequency ranges

R.A. Brazhe¹, E.Yu. Lebedev²

^{1,2}Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

¹brazhe@ulstu.ru, ²lebedev.egor@ulsk173.ru

Abstract. *Background.* In recent years, there has been an information boom around fractal antennas designed for wireless communication systems at a wide variety of frequencies. However, there is still no clear opinion among experts on whether such antennas have better characteristics than conventional canonical antennas. In this regard, the purpose of this article is an investigation of fractal patch antennas in modern communication systems of the greatest practical interest at gigahertz and terahertz frequencies. *Materials and methods.* The paper considers two identical-shaped monopole fractal patch antennas of the “Sierpinski carpet” type: gigahertz and terahertz. The following characteristics of both antennas are investigated: frequency dependences of the scattering matrix, VSWR, input impedance and radiation pattern. It is taken into account that in the terahertz range it is necessary to take into account the fact that plasmon-polaritons with strongly pronounced dispersion properties are excited in the patch. The simulation was carried out in the CST Microwave Studio program separately for the initial triangular canonical antenna and its three fractal iterations. *Results.* It is shown that the fractalization of an electromagnetic GHz antenna does not provide tangible advantages over the original non-fractal antenna in terms of either the number of operating frequencies or the quality of the radiation pattern, and this fractalization even worsens the situation in a number of parameters. On the contrary, in the case of a plasmon-polariton THZ antenna, due to the dispersion properties of plasmon-polaritons, it is possible to increase both the number of antenna bandwidth, the intensity of the main lobe of the radiation pattern, and its angular width. *Conclusion.* The often advertised advantages of fractal antennas at frequencies up to gigahertz are actually just a fashion statement. At the same time, in the case of terahertz plasmon-polariton antennas, their fractalization makes it possible to realize new possibilities in terms of multiband and efficient control of characteristics.

Keywords: fractal patch antennas, gigahertz, terahertz, characteristics, efficiency

For citation: Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Studying the fractal patch antennas in the gigahertz and terahertz frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):29–40. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-3

Введение

В последние годы наблюдается всплеск числа публикаций, посвященных разработке и математическому моделированию характеристик фрактальных патч-антенн, предназначенных для систем беспроводной связи в различных частотных диапазонах [1–9]. Ряд исследователей отмечает в качестве преимуществ таких антенн их компактность, многополосность и широкополосность по сравнению с традиционно применяемыми антеннами, в том числе,

патч-антеннами [1, 4–6, 10–12]. Другие утверждают, что никаких заметных преимуществ фрактализация антенны не дает [13]: количество рабочих частот не возрастает, ширина их полосы существенным образом не увеличивается, а ряд характеристик даже ухудшается. Якобы при этом уменьшается сопротивление излучения, диаграмма направленности искажается, а интенсивность ее главного лепестка быстро падает с увеличением частоты сигнала. Кроме того, фрактальные антенны в конструктивном и технологическом отношении сложнее и себестоимость их выше.

В связи с неоднозначностью мнений о том, обладают ли фрактальные антенны какими-либо преимуществами по сравнению с их обычными аналогами, возникает актуальная задача разобраться в этом вопросе путем поэтапного по числу итераций моделирования технических характеристик обоих типов антенн и их сравнения между собой. При этом необходимо принять во внимание, что вплоть до частот порядка 100 ГГц рассматриваемого типа антенны можно считать электромагнитными, а в терагерцовом диапазоне приходится учитывать возбуждение в них связанных состояний электромагнитных волн и волн зарядовой плотности – плазмон-поляритонов, обладающих резко выраженными дисперсионными свойствами.

Целью настоящей статьи и является решение данной задачи.

Материалы и методы

Рассматриваются две монополярные фрактальные патч-антенны типа «треугольный ковер Серпинского»: одна для работы в диапазоне частот 4–100 ГГц, другая – в диапазоне 200–1300 ТГц. Форма патчей обеих антенн одинакова и представляет собой треугольник Серпинского в итерациях 0, 1, 2, 3 (рис. 1).

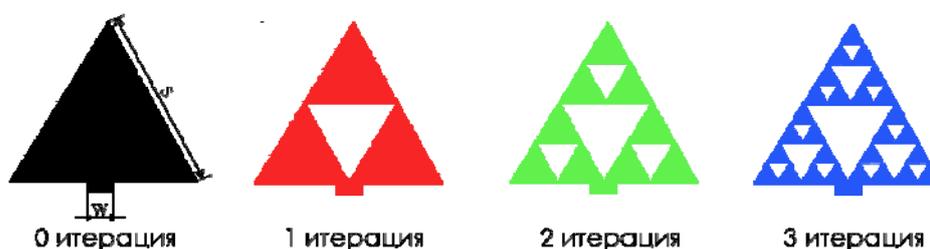


Рис. 1. Геометрия исследуемых патч-антенн. Для ГГц-антенны: материал – медь, длина стороны большого треугольника $s = 2,63$ мкм; диэлектрик – фторопласт ($\epsilon_r = 2,5$), его толщина $t = 0,1$ мм; ширина сигнального полоска $W = 1,09$ мм. Для ТГц-антенны: материал – графен, $s = 625$ нм; диэлектрик – карбид кремния ($\epsilon_r = 9,66$); $t = 10$ нм; $W = 40$ нм

Между патчем и заземленной металлической пластиной находится диэлектрик. В случае плазмон-поляритонной ТГц-антенны для сдвига уровня Ферми в графене относительно точки Дирака между ним и заземленной пластиной прикладывается затворное напряжение положительной полярности, чтобы реализовать в графене электронную проводимость.

Математическое моделирование характеристик обеих антенн осуществлялось в программе CST Microwave Studio. В ней заложен следующий подход к проблеме: уравнения Максвелла сводятся к волновым уравнениям,

затем волновое уравнение для напряженности электрического поля приводится к неоднородному уравнению Гельмгольца, которое с учетом однородных граничных условий решается с использованием функций Грина, где источником является плотность тока проводимости. Таким образом, электрическое поле, возбуждаемое совокупностью колеблющихся электронов в различных точках антенны, является суммой полей, создаваемых в отдельных точках. Далее находится распределение электрического поля или мощности излучения антенны в дальней зоне, выраженное через преобразование Фурье распределения тока проводимости [5].

В случае плазмон-поляритонной антенны вследствие дисперсии удельного сопротивления графена плотность тока проводимости испытывает сильную зависимость от частоты сигнала. Поэтому приходится дополнительно вводить в программу расчета характеристик антенны эту зависимость. При этом для ТГц-антенн обычно ограничиваются приближением Друде, учитывающем лишь внутризонную поверхностную проводимость графена [5]. Ниже мы частично ссылаемся на результаты из нашей работы [8], в которой также использовано это приближение.

Результаты

Частотные зависимости основных характеристик

На рис. 2, 3 приведены результаты расчетов частотной зависимости элемента S_{11} матрицы рассеяния, коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) и входного импеданса Z обеих исследуемых антенн.

Первое, что бросается в глаза на рис. 2, это то, что ширина резонансных полос существенно не зависит от наличия фрактальной структуры и порядка итерации. Второе – что положение резонансных пиков, отвечающих высшим модам, в зависимости от порядка итерации, может сдвигаться как в сторону меньших, так и в сторону больших частот. При этом острота пиков и их высота изменяются слабо.

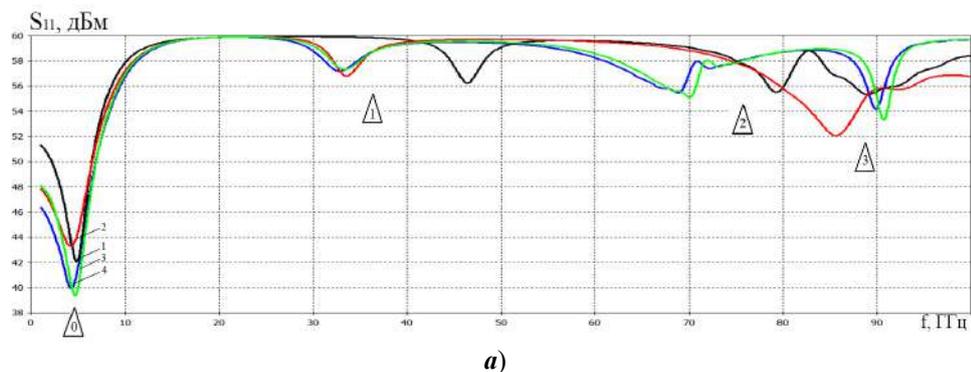


Рис. 2. Частотные зависимости параметра S_{11} в децибелах на милливатт (а), коэффициент стоячей волны напряжения (б) и Z -параметра (в) электромагнитной ТГц-антенны для различных итераций «ковра Серпинского». Цифры у кривых указывают порядок итерации, а цифры в треугольниках – номер резонанса (0 соответствует частоте основного резонанса, а 1, 2, 3 – резонансным частотам ближайших высших мод)

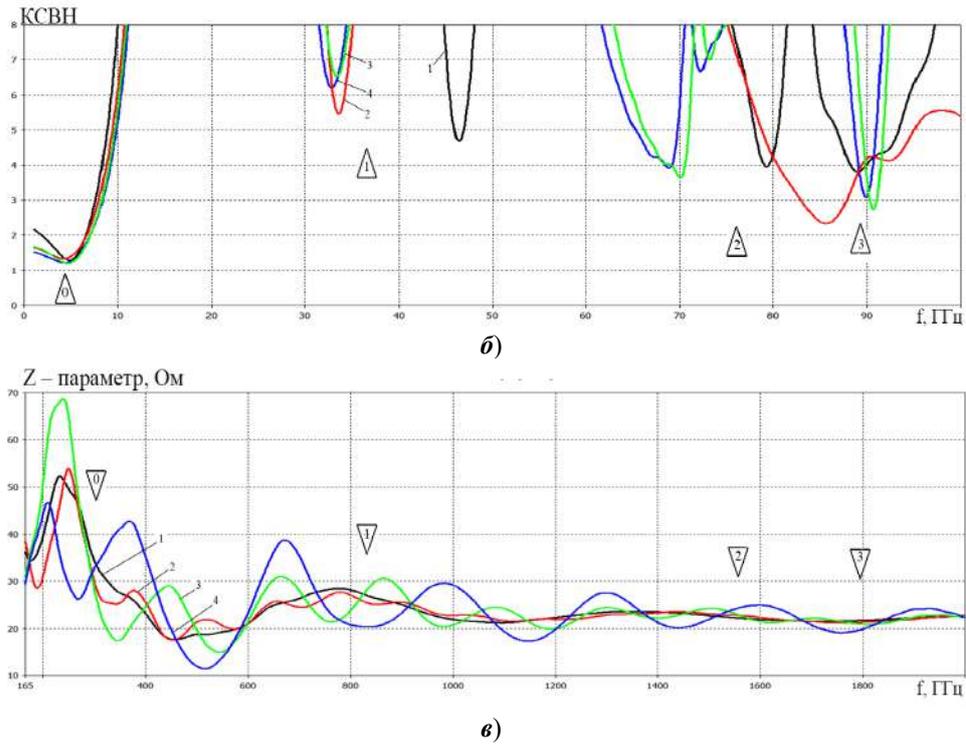


Рис. 2. Окончание

Для большей наглядности полученные результаты сведены в табл. 1, 2 отдельно для электромагнитной ГГц-антенны и плазмон-поляритонной ГГц-антенны.

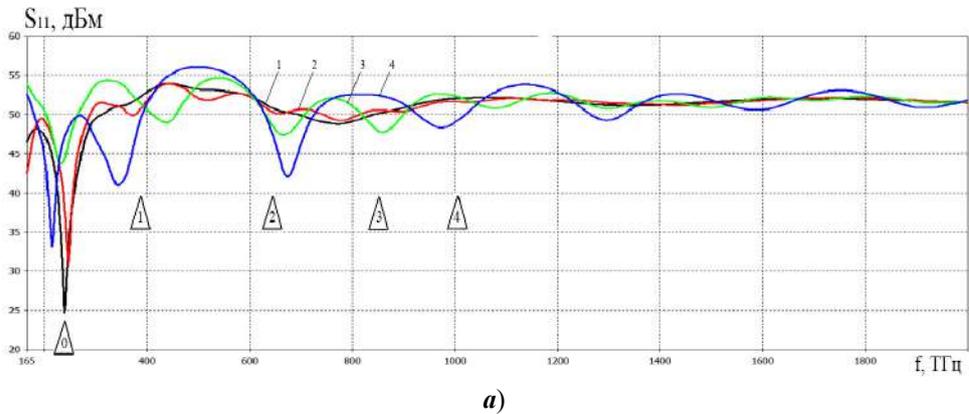


Рис. 3. Частотные зависимости параметра S_{11} в децибелах на милливатт (а), коэффициент стоячей волны напряжения (б) и Z-параметра (в) плазмон-поляритонной ГГц-антенны для различных итераций «ковра Серпинского». Цифры у кривых указывают порядок итерации, а цифры в треугольниках – номер резонанса (0 соответствует частоте основного резонанса, а 1, 2, 3, 4 – резонансным частотам ближайших высших мод

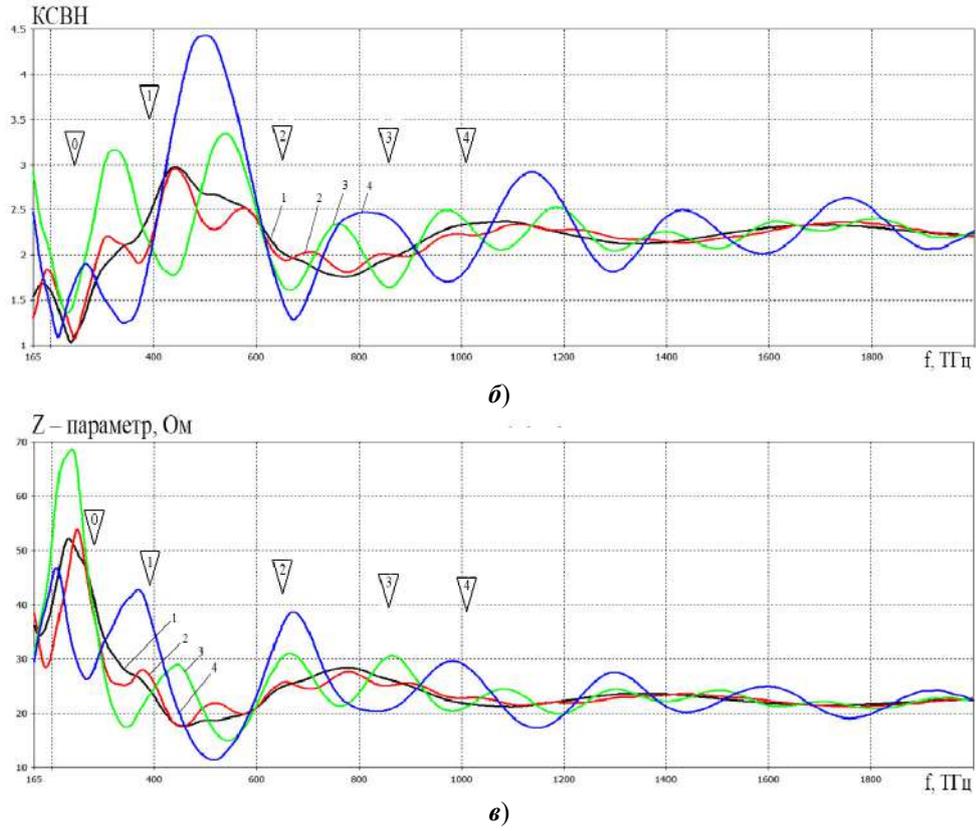


Рис. 3. Окончание

Таблица 1
Характеристики исследуемой электромагнитной ГГц-антенны

Итерация	Резонансная частота, ГГц	КСВН	Z, Ом	S_{11} , дБм
0	4,86	1,29	40	42
	46,4	4,70	184	56
	79,3	3,95	39	56
	89,0	3,82	158	55
1	3,52	1,35	39	43
	33,7	5,61	244	57
	85,8	2,31	113	52
	92,6	4,23	43	56
2	3,38	1,31	40	43
	33,6	6,18	252	57
	70,6	3,50	160	55
	91,2	2,57	96	53
3	4,30	1,22	43	40
	32,9	6,21	237	58
	68,8	3,92	193	56
	89,9	3,09	107	54

В то же время на рис. 3 заметно сильное влияние фрактализации на характеристики плазмон-поляритонной ГГц-антенны. Если для канонической

нефрактальной антенны в исследованном диапазоне частот наблюдается лишь один резонансный пик, то ее фрактализация уже в первом порядке приводит к появлению пяти новых резонансных частот. Острота пиков также увеличивается с возрастанием порядка итерации. На КСВН фрактализация такой антенны сильно не сказывается. Входной импеданс изменяется не так сильно, как в случае электромагнитной ГГц-антенны.

Таблица 2

Характеристики исследуемой плазмон-поляритонной ТГц-антенны

Итерация	Резонансная частота, ТГц	КСВН	Z, Ом	S ₁₁ , дБм
0	238	1,04	52	25
1	246	1,08	54	31
	371	1,90	28	50
	517	2,28	22	52
	657	1,93	26	50
	776	1,80	28	49
2	233	1,37	68	44
	437	1,77	29	49
	664	1,59	31	47
	859	1,62	31	48
	1075	2,04	25	51
3	213	1,09	46	53
	343	1,25	41	41
	673	1,27	39	42
	972	1,69	30	48
	1294	1,79	28	49

Диаграммы направленности

На рис. 4, 5 представлены диаграммы направленности исследуемых электромагнитной ГГц-антенны и плазмон-поляритонной ТГц-антенны соответственно. На них отражена зависимость формы, направленности, интенсивности главного лепестка, наличия и интенсивности боковых лепестков этих диаграмм от порядка итерации «ковра Серпинского» (столбцы слева направо) и резонансной частоты (возрастает сверху вниз).

Сравнивая рис. 4, 5, а также приведенные при них характеристики диаграмм направленности, можно заметить, что фрактализация канонической нефрактальной электромагнитной антенны не улучшает, а в ряде случаев даже ухудшает ее свойства. В случае же плазмон-поляритонной антенны имеет место перераспределение энергии излучения по резонансным частотам и улучшение некоторых свойств антенны.

Обсуждение

Из результатов, представленных на рис. 2–5 и в табл. 1, 2, следует, что фрактализация электромагнитной монополюсной треугольной патч-антенны ТГц-диапазона не влияет на количество ее резонансных частот. Независимо от порядка итерации (от 1 до 3), во всех случаях в диапазоне частот 4–100 ГГц наблюдалось столько же резонансов, сколько их имелось в обычной, нефрактальной антенне, т.е. частота основного резонанса, отвечающего исходному треугольнику, плюс еще три резонанса на высших модах. При пе-

реходе на более высокие резонансные частоты КСВН существенно ухудшается, а входной импеданс сначала резко возрастает (на первой высшей моде), а затем падает. Параметр рассеяния возрастает не более, чем в 1,4 раза.

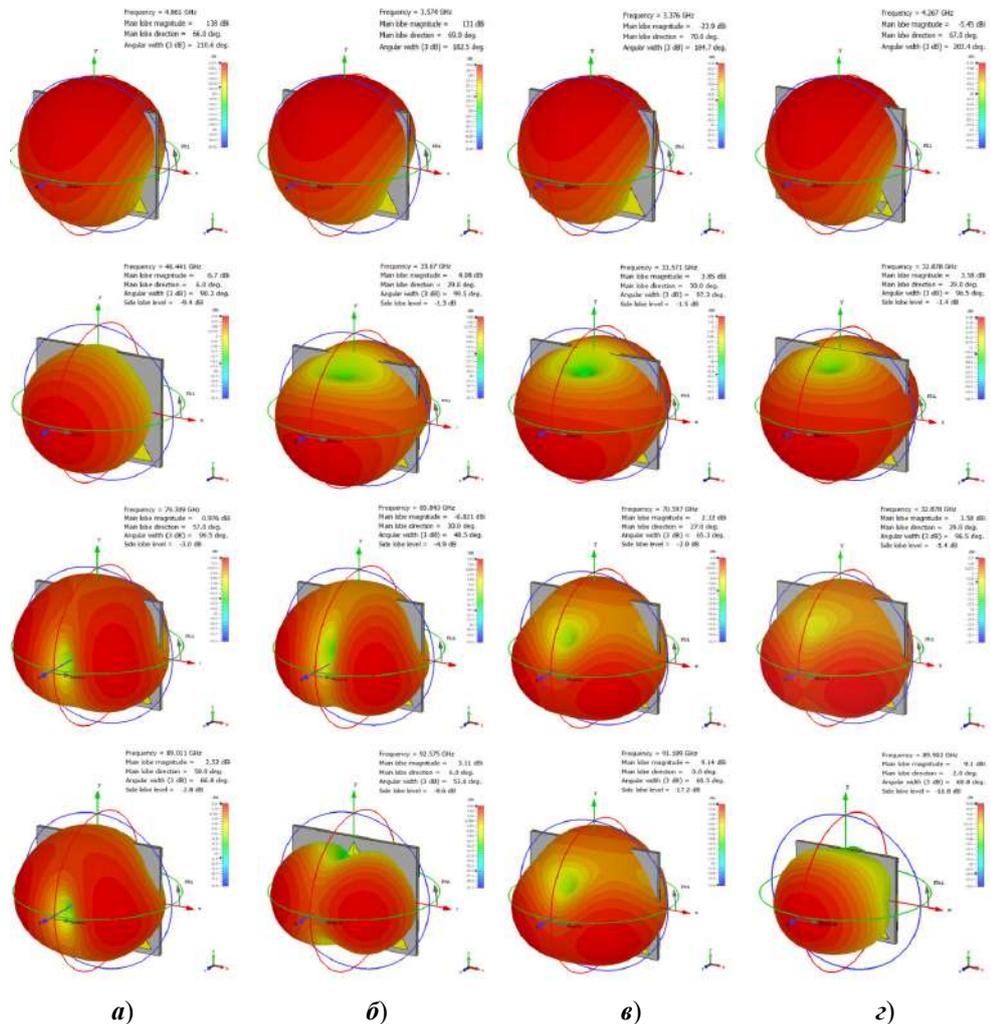


Рис. 4. Диаграммы направленности электромагнитной ГГц-антенны в зависимости от порядка итерации «ковра Серпинского» (0-я итерация (а), 1-я итерация (б), 2-я итерация (в), 3-я итерация (г)) и резонансной частоты (по вертикали)

На основной резонансной частоте с увеличением порядка итерации интенсивность главного лепестка диаграммы направленности быстро падает, а ее форма вытягивается в одну сторону. На более высоких резонансных частотах интенсивность главного лепестка диаграммы направленности значительно меньше, чем на основной резонансной частоте, и быстро падает с ростом частоты. Форма диаграммы направленности изменяется, и появляются боковые лепестки.

В случае плазмон-поляритонной монополярной патч-антенны ГГц-диапазона такой же формы фрактализация патча вносит заметные изменения в ее характеристики. Начиная уже с первой итерации увеличивается количе-

ство резонансных частот. В диапазоне частот 200–1300 ТГц их насчитывается до пяти. При этом почти на всех резонансных частотах КСВН <2 и лишь в двух случаях слегка превышает значение 2. Входной импеданс антенны на высших модах ниже, чем на основном резонансе, но не более, чем в 1,6–2,7 раза. Параметр рассеяния возрастает не более чем в 2,1 раза.

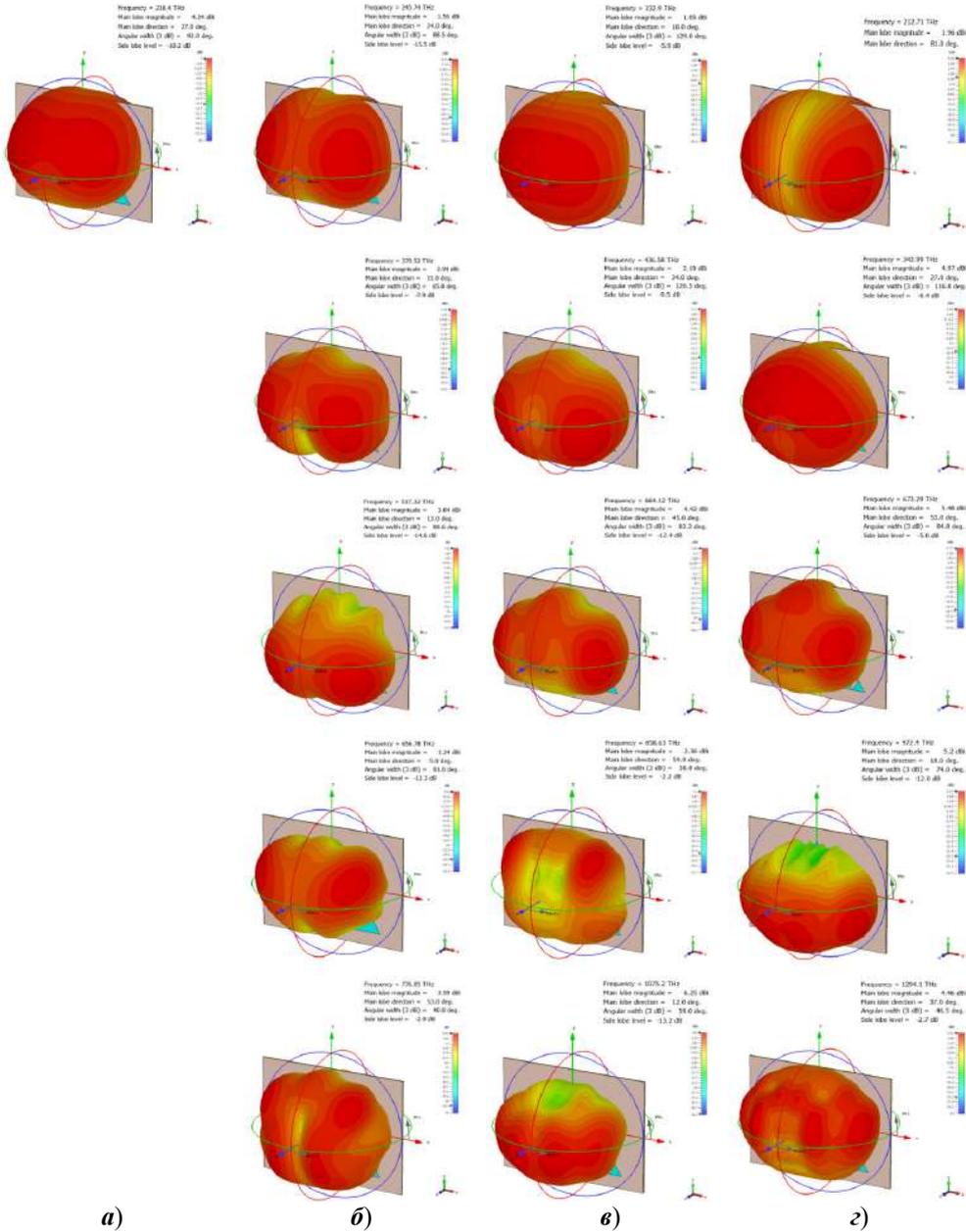


Рис. 5. Диаграммы направленности плазмон-поляритонной ТГц-антенны в зависимости от порядка итерации «ковра Серпинского» (0-я итерация (а), 1-я итерация (б), 2-я итерация (в), 3-я итерация (г)) и резонансной частоты (по вертикали)

Диаграмма направленности меняет форму, и появляются боковые лепестки лишь начиная с третьей итерации «ковра Серпинского». С увеличением порядка итерации интенсивность главного лепестка диаграммы направленности и ее угловая ширина могут даже увеличиваться.

На наш взгляд, причиной столь разного влияния фрактализации электромагнитных и плазмон-поляритонных антенн на их характеристики является дисперсия электропроводности, диэлектрической проницаемости и, как следствие, скорости распространения плазмон-поляритонных волн.

Электромагнитные волны с волнами зарядовой плотности в материале ГГц-антенны не образуют плазмон-поляритонов и практически не обладают дисперсией. Резонансы на высших модах колебаний определяются геометрией антенны. Фрактальные элементы антенны, имея кратно меньшие размеры, начинают работать на тех же самых частотах. Сигналы от них приходят с различными фазовыми сдвигами, что может даже ухудшить результирующие характеристики антенны.

В случае плазмон-поляритонной ГГц-антенны резонансы на высших модах исходной структуры практически не наблюдаются. По мере кратного уменьшения размеров фрактальных элементов антенны их резонансные отклики накладываются на основной сигнал, однако из-за разной скорости распространения плазмон-поляритонов для различных итераций фрактала их резонансные частоты сдвинуты относительно друг друга. В итоге результирующий сигнал для различных фрактальных итераций антенны выглядит поразному. Но при этом наблюдается общая закономерность: с увеличением порядка итерации вклад высших резонансов возрастает.

Заключение

Приведенные в работе результаты свидетельствуют о том, что использование фрактальных патч-антенн вплоть до гигагерцового диапазона с целью увеличения их многополосности при более высокой компактности не оправдывает возлагаемых на них надежд, а приводит лишь к их усложнению и удорожанию.

Применение плазмон-поляритонных фрактальных патч-антенн в терагерцовом диапазоне, напротив, позволяет достигнуть положительных результатов в виде возрастания числа резонансных частот, на которых реализуются неплохие характеристики.

Кроме того, изменяя затворное напряжение между патчем и заземленной пластиной плазмон-поляритонной антенны, можно управлять ее рабочими частотами.

Список литературы

1. Al-Zabee A. A. K., Jabbar S. Q., Wang D. Fractal antennas (Study and Review) // International Journal of Computers and Technology. 2016. Vol. 15, № 13. P. 7387–7400. doi: 10.24297/ijct_v15i13.31
2. Бойков И. В., Айкашев П. В. К вопросу об анализе и синтезе фрактальных антенн // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 4. С. 92–110. doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
3. Avula R., Rangarao M., Kumari Y. Fractal ultra wide band antenna for 5G applications // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2020. Vol. 7, № 5S4. P. 215–218.

4. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 840. P. 012003. doi: 10.1088/1757-899X/840/1/012003
5. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1060. P. 012001. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012001
6. Вдовина Г. М. Краткий обзор результатов исследования новых методов генерации, передачи и приема колебаний и волн на основе методов фрактальной геометрии // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2020. Т. 28, № 1. С. 8–28. doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-8-28
7. Смирнов А. В., Фионов А. С., Горбачев И. А., Шамсутдинова Е. С., Кузнецова И. Е., Колесов В. В. Использование аддитивных технологий для создания широкополосных антенн с фрактальной геометрией // *Радиоэлектроника*. 2021. Т. 13, № 4. С. 427–434. doi: 10.17725/rensit.2021.13.427
8. Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Фрактальная графеновая плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ближнего инфракрасного и оптического диапазонов частот // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2024. № 2. С. 98–111. doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7
9. Браже Р. А., Лебедев Е. Ю. Дипольная графеновая фрактальная плазмон-поляритонная патч-наноантенна для ИК и оптического диапазона частот // *Радиоэлектронная техника : межвузовский сб. науч. тр. Ульяновск : УлГТУ*, 2024. С. 30–39.
10. Rosa L., Sun K., Juodkazis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas // *Physica Status Solidi (RRL)*. 2011. Vol. 5, № 5–6. P. 175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
11. Sederberg S., Elezzabi A. Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna // *Optic Express*. 2011. Vol. 19, № 11. P. 10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
12. Hussien R. T., Abood D. I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna // *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*. 2014. Vol. 5, № 9. P. 1–8.
13. Hansen R. C., Colin R. E. *Small Antenna Handbook*. John Wiley and Sons, 2011. 360 p.

References

1. Al-Zabee A.A.K., Jabbar S.Q., Wang D. Fractal antennas (Study and Review). *International Journal of Computers and Technology*. 2016;15(13):7387–7400. doi: 10.24297/ijct_v15i13.31
2. Boykov I.V., Aykashev P.V. On the issue of analysis and synthesis of fractal antennas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2017;(4):92–110. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2018-1-8
3. Avula R., Rangarao M., Kumari Y. Fractal ultra wide band antenna for 5G applications. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020;7(5S4):215–218.
4. Boretti A., Rosa L., Blackledge J., Castelletto S. A preliminary study of a graphene fractal Sierpinski antenna. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;840:012003. doi: 10.1088/1757-899X/840/1/012003
5. Blackledge J., Boretti A., Rosa L., Castelletto S. Fractal graphene patch antennas and the THz communications revolution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1060:012001. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012001
6. Vdovina G.M. A brief overview of the results of research into new methods of generating, transmitting and receiving oscillations and waves based on fractal geometry methods. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika = University proceedings*. Ap-

- plied nonlinear dynamics*. 2020;28(1):8–28. (In Russ.). doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-8-28
7. Smirnov A.V., Fionov A.S., Gorbachev I.A., Shamsutdinova E.S., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V. Using additive manufacturing to create broadband antennas with fractal geometry. *Radioelektronika = Radioelectronics*. 2021;13(4):427–434. (In Russ.). doi: 10.17725/rensit.2021.13.427
 8. Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Fractal graphene plasmon-polariton patch nanoantenna for near infrared and optical frequency ranges. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(2):98–111. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2024-2-7
 9. Brazhe R.A., Lebedev E.Yu. Dipole graphene fractal plasmon-polariton patch nanoantenna for IR and optical frequency range. *Ra-dioelektronnaya tekhnika: mezhvuzovskiy sb. nauch. tr. = Radioelectronic engineering: interuniversity collected papers*. Ulyanovsk: UIGTU, 2024:30–39. (In Russ.)
 10. Rosa L., Sun K., Juodkazis S. Sierpinski fractal plasmonic nanoantennas. *Physica Status Solidi (RRL)*. 2011;5(5–6):175–177. doi: 10.1002/pssr.201105136
 11. Sederberg S., Elezzabi A.Y. Sierpinski fractal plasmonic antenna: A fractal abstraction of the plasmonic bowtie antenna. *Optic Express*. 2011;19(11):10456–10461. doi: 10.1364/OE.19.010456
 12. Hussien R.T., Abood D.I. A wideband hybrid plasmonic patch nanoantenna. *International Journal of Electronics and Communication Engineering and Technology (IJECET)*. 2014;5(9):1–8.
 13. Hansen R.C., Colin R.E. *Small Antenna Handbook*. John Wiley and Sons, 2011:360.

Информация об авторах / Information about the authors

Рудольф Александрович Браже

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
физики, Ульяновский государственный
технический университет (Россия,
г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)

E-mail: brazhe@ulstu.ru

Rudol'f A. Brazhe

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of the sub-
department of physics, Ulyanovsk State
Technical University (32 Severniy Venets
street, Ulyanovsk, Russia)

Егор Юрьевич Лебедев

студент, Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск,
ул. Северный Венец, 32)

E-mail: lebedev.egor@ulsk173.ru

Egor Yu. Lebedev

Student, Ulyanovsk State Technical
University (32 Severniy Venets street,
Ulyanovsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.04.2025

Принята к публикации / Accepted 23.05.2025

УДК 621.396:681.323

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-4

Селекция движущихся целей бортовой радиолокационной станцией с внешней когерентностью

С. И. Зиятдинов¹, О. И. Красильникова²

^{1,2}Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

¹ziat.53@mail.ru, ²oikrasilnikova@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена работа бортовой системы селекции движущихся целей (СДЦ) с внешней когерентностью при разрывной пассивной помехе. Для повышения эффективности работы системы СДЦ в составе тракта обработки использован узкополосный фильтр, выходной сигнал которого является опорным для системы СДЦ в разрывах пассивной помехи. Цель работы – разработка и исследование средств селекции движущихся целей бортовой радиолокационной станцией (РЛС) в условиях разрывной пассивной помехи. Необходимо показать, что выходной сигнал узкополосного фильтра, настроенного на частоту пассивной помехи, сохраняет все статистические свойства пассивной помехи, предшествующей появлению разрыва, и может быть использован как опорное напряжение в системе СДЦ. Требуется исследовать работу системы СДЦ при разрывной пассивной помехе.

Материалы и методы. В основу работы положен спектрально-корреляционный метод анализа статистических свойств сигналов и устройств их обработки. *Результаты.* Получено выражение для выходного сигнала узкополосного фильтра, расстроенного относительно частоты пассивной помехи. Показано, что выходной сигнал узкополосного фильтра сохраняет все статистические свойства пассивной помехи и может быть использован в качестве опорного напряжения в системе СДЦ с внешней когерентностью. Представлены результаты расчетов коэффициента подавления пассивной помехи и коэффициента подпомеховой видимости в зависимости от статистических характеристик полезного сигнала и пассивной помехи. *Выводы.* Предложенный метод создания опорного напряжения для бортовой системы СДЦ с внешней когерентностью позволяет эффективно решать задачу обнаружения движущихся целей на фоне разрывных пассивных помех. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании бортовых доплеровских РЛС, использующих средства СДЦ.

Ключевые слова: пассивная помеха, система селекции движущихся целей, узкополосный фильтр, коэффициент подавления пассивной помехи, коэффициент подпомеховой видимости

Для цитирования: Зиятдинов С. И., Красильникова О. И. Селекция движущихся целей бортовой радиолокационной станцией с внешней когерентностью // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 41–51. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-4

Selection of moving targets of an airborne radar station with external coherence

S.I. Ziatdinov¹, O.I. Krasilnikova²

^{1,2}Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

¹ziat.53@mail.ru, ²oikrasilnikova@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper considers the operation of an onboard moving target selection system (MTS) with external coherence under discontinuous passive interference. To improve the efficiency of the MTS system, a narrowband filter is used in the processing path, the output signal of which is a reference for the MTS system in the gaps of passive interference. The purpose of the work is to develop and study the means of selecting moving targets of an onboard radar under conditions of discontinuous passive interference. It is necessary to show that the output signal of a narrowband filter tuned to the frequency of passive interference retains all the statistical properties of the passive interference preceding the appearance of the gap, and can be used as a reference voltage in the MTS system. It is required to study the operation of the MTS system under discontinuous passive interference. *Materials and methods.* The work is based on the spectral-correlation method for analyzing the statistical properties of signals and devices for their processing. *Results.* An expression is obtained for the output signal of a narrowband filter detuned relative to the frequency of passive interference. It is shown that the output signal of the narrow-band filter retains all statistical properties of passive interference and can be used as a reference voltage in the MTC system with external coherence. The results of calculating the passive interference suppression coefficient and the coefficient of sub-interference visibility are presented depending on the statistical characteristics of the useful signal and passive interference. *Conclusions.* The proposed method for creating a reference voltage for an onboard MTC system with external coherence allows one to effectively solve the problem of detecting moving targets against the background of discontinuous passive interference. The results obtained in the article can be useful in designing onboard Doppler radars using MTC tools.

Keywords: passive interference, moving target selection system, narrow-band filter, passive interference suppression coefficient, sub-interference visibility coefficient

For citation: Ziatdinov S.I., Krasilnikova O.I. Selection of moving targets of an airborne radar station with external coherence. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2025;(2):41–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-4

Введение

В реальных условиях работа радиолокационных систем обнаружения и измерения параметров целей усложняется воздействием различного рода помех. Это могут быть внутриприемный шум, пассивные помехи в виде отражений от земной, водной поверхностей и метеообразований и специально организованные помехи [1–4].

Вопросы подавления мешающих сигналов достаточно полно освещены в отечественной литературе [5–8]. Так, для борьбы с пассивными помехами применяются средства селекции движущихся целей (СДЦ) в виде разнообразных фильтров – череспериодные вычитающие устройства различной кратности, полосовые доплеровские фильтры.

В наземных радиолокационных станциях (РЛС) реализация устройств СДЦ для подавления отражений от земной и водной поверхностей не представляет больших трудностей, так как частота мешающих сигналов совпадает с частотой зондирующих сигналов РЛС. Задача несколько усложняется при подавлении отражений от перемещающихся метеообразований. Однако скорость движения метеообразований относительно мала и использование адаптивных режекторных фильтров или простых схем «компенсации» скорости ветра позволяет эффективно решать задачу подавления пассивных помех.

Большие трудности возникают при создании средств СДЦ в бортовых РЛС, так как скорость движения носителей РЛС может лежать в диапазоне от нескольких сотен до нескольких тысяч километров в час. При этом частота

Доплера сигналов, отраженных земной или водной поверхностями, может достигать нескольких десятков килогерц.

В статье [9] рассмотрен вариант «компенсации» частоты Доплера при построении бортовой доплеровской системы СДЦ с внутренней когерентностью, при котором с помощью бортовых датчиков углового положения антенны и датчика путевой скорости бортовой ЦВМ вычисляется значение частоты Доплера и в виде поправки частоты вводится в частоту опорного напряжения системы СДЦ.

Однако на практике такая задача в настоящее время не решена из-за больших ошибок измерения частоты Доплера. Поэтому для решения вопроса подавления отражений от земной и водной поверхностей средствами СДЦ используется режим внешней когерентности, при котором в качестве опорного напряжения выступает сама пассивная помеха. Очевидно, что система СДЦ с внешней когерентностью будет работать только в случае наличия отражений от подстилающей поверхности.

На практике отражения от подстилающей поверхности носят разрывной характер. Например, при полете над спокойной водной поверхностью отраженный сигнал практически отсутствует и, следовательно, обнаружение движущихся по или над поверхностью целей становится невозможным. При этом протяженность участков спокойной водной поверхности может составлять от нескольких сотен метров до нескольких километров и более.

Вопросы обеспечения устойчивой работы бортовых систем СДЦ в условиях разрывных пассивных помех составляют основное содержание настоящей работы.

Метод восстановления внешней когерентности

На рис. 1,б показана возможная реализация во времени разрывной пассивной помехи, когда на время Δt отсутствует пассивная помеха.

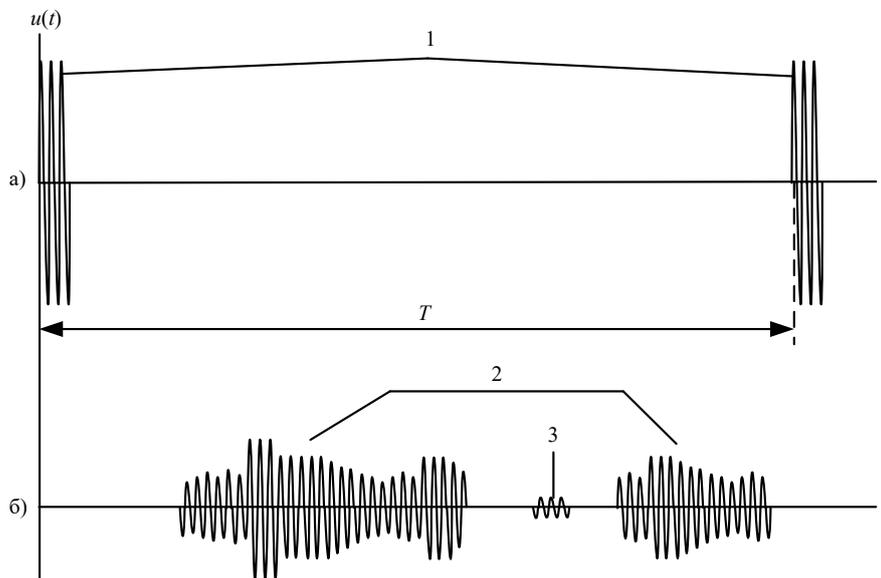


Рис. 1. Сигналы в контрольных точках:

1 – зондирующие импульсы; 2 – пассивная помеха; 3 – полезный сигнал

На практике уровень пассивной помехи может на 40 дБ и более превышать уровень полезного сигнала, отраженного движущейся целью. Для обеспечения режима внешней когерентности необходимо продлить напряжение пассивной помехи, предшествующей возникающему разрыву, что показано на рис. 2,б. Эту задачу можно решить с использованием узкополосного фильтра, настроенного на частоту пассивной помехи и обладающего постоянной времени, соизмеримой или большей длительности разрыва пассивной помехи Δt . Возможное решение данной задачи показано на рис. 3.

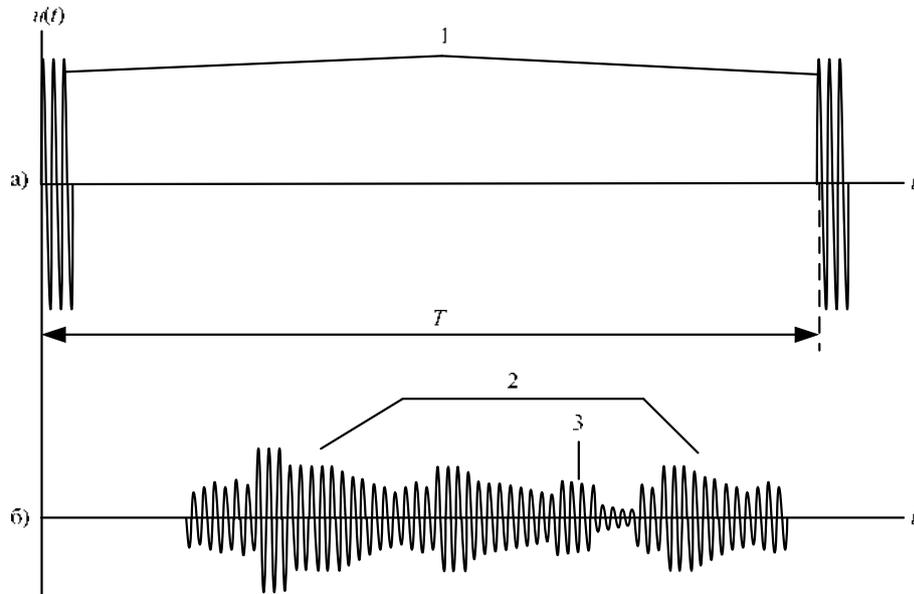


Рис. 2. Сигналы в контрольных точках:
1 – зондирующие импульсы; 2 – пассивная помеха; 3 – полезный сигнал

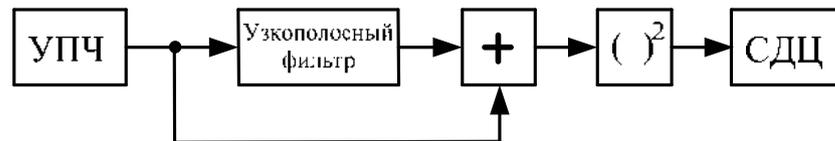


Рис. 3. Устройство обработки сигналов

В данном устройстве напряжение пассивной помехи с выхода усилителя промежуточной частоты (УПЧ) поступает на узкополосный фильтр, «растягивается» в нем на время, большее отрезка Δt , и далее подается на сумматор в качестве опорного напряжения, где суммируется с выходным сигналом УПЧ. Тем самым восстанавливается режим внешней когерентности для системы СДЦ.

Очевидно, что нормальная работа рассматриваемого устройства будет только в том случае, когда выходное напряжение узкополосного фильтра полностью сохранит статистические свойства предшествующей разрыву пассивной помехи. Для этого рассмотрим прохождение пассивной помехи через

узкополосный фильтр. Представим пассивную помеху в виде периодической последовательности отрезков гармонического колебания длительностью τ_n , частотой ω_n , периодом следования T и с флюктуирующими амплитудой $U(t)$ и начальной фазой $\varphi_n(t)$

$$u_n(t) = U_n(t) \cos[\omega_n t + \varphi_n(t)], \quad t = nT + \tau, \quad \tau = 0 \div \tau_n,$$

которую перепишем в виде

$$u_n(t) = U_n(t) \cos[\omega_n t + \varphi_o(t)], \quad \varphi_o(t) = \omega_n nT + \varphi_n(t), \quad t = 0 \div \tau_n.$$

В качестве узкополосного фильтра используем полосовой фильтр с частотной передаточной функцией

$$W(j\omega) = \frac{\omega_{cp}}{\omega_{cp} + j(\omega \pm \omega_{\phi})},$$

где ω_{ϕ} , ω_{cp} – частоты настройки и среза фильтра.

В общем виде частота пассивной помехи ω_n не совпадает с частотой настройки фильтра ω_{ϕ} . Эта разность частот может достигать нескольких десятков килогерц и определяется величиной частоты Доплера пассивной помехи вследствие движения носителя РЛС.

На основании теории вычетов [10, 11] после громоздких промежуточных преобразований выходной сигнал узкополосного фильтра записывается следующим образом:

$$u_{\phi}(t) = \frac{U(t)\omega_{cp}e^{j\Delta\varphi}}{\sqrt{\omega_{cp}^2 + \Delta\omega^2}} \left\{ \cos[\omega_n t + \varphi_n(t)] - e^{-\omega_{cp}t} \cos[\omega_{\phi}t + \varphi_o(t)] \right\}, \quad t = 0 \div \tau_n; \quad (1)$$

$$u_{\phi}(t) = \frac{U(t)\omega_{cp}e^{j\Delta\varphi}}{\sqrt{\omega_{cp}^2 + \Delta\omega^2}} \left[e^{-\omega_{cp}(t-\tau_n)} - e^{-\omega_{cp}t} \right] \cos[\omega_{\phi}t + \varphi_o(t)], \quad t = \tau_n \div \infty, \quad (2)$$

здесь, как было показано ранее, $\varphi_o(t) = \omega_n nT + \varphi_n(t)$, а фазовый сдвиг

$$\Delta\varphi = \arctg \frac{\omega_{cp}\Delta\omega}{\omega_{cp}^2 + \Delta\omega^2}.$$

где $\Delta\omega = \omega_n - \omega_{\phi}$ – разность частот пассивной помехи и частоты настройки узкополосного фильтра.

Для заполнения разрывов пассивной помехи колебаниями выходного сигнала узкополосного фильтра необходимо, чтобы время переходного процесса в фильтре превышало длительность возможного разрыва пассивной помехи.

Из выражения (1) следует, что за время действия рассматриваемого импульса пассивной помехи в выходном сигнале узкополосного фильтра имеют место биения сигнала помехи с частотой ω_n и свободных колебаний сигнала узкополосного фильтра с частотой ω_{ϕ} . При этом по окончании импульса пассивной помехи выходной сигнал узкополосного фильтра определяется только его свободными колебаниями с частотой ω_{ϕ} .

На рис. 4 в качестве примера показана реакция узкополосного фильтра на радиоимпульс пассивной помехи для случая, когда длительность импульса пассивной помехи $\tau_{\text{п}} = 0,3/\omega_{\text{ср}}$.

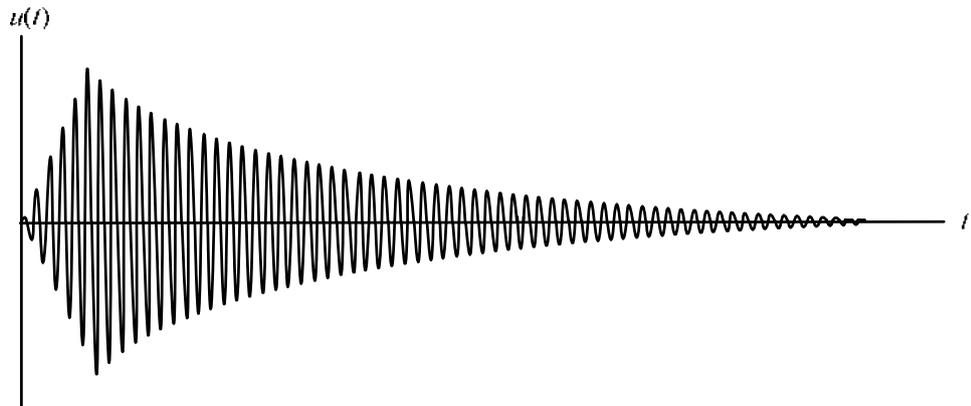


Рис. 4. Выходной сигнал узкополосного фильтра

Ранее отмечалось, что для работы системы СДЦ в режиме внешней когерентности статистические свойства выходного сигнала узкополосного фильтра и предшествующей разрыву пассивной помехи должны совпадать. Из соотношений (1) и (2) видно, что выходной сигнал узкополосного фильтра сохраняет информацию о флюктуирующей амплитуде $U(t)$ и начальной фазе пассивной помехи $\varphi_{\text{п}}(t)$. При этом отличие частоты пассивной помехи и частоты свободных колебаний выходного сигнала узкополосного фильтра в пределах радиолокационного периода для системы СДЦ не принципиально, так как система СДЦ реагирует на межпериодные флюктуации пассивной помехи, которые определяются только флюктуациями амплитуды $U(t)$ и начальной фазы $\varphi_{\text{п}}(t)$.

Поскольку рассматриваемая система СДЦ в пределах разрыва пассивной помехи осуществляет межпериодную обработку аддитивной смеси полезного сигнала и выходного сигнала узкополосного фильтра, сигнал на выходе сумматора запишем в виде

$$\begin{aligned} u_{\Sigma}(nT) &= u_{\text{с}}(nT) + u_{\text{ф}}(nT) = \\ &= U_{\text{с}} \cos(\omega_{\text{с}}nT + \varphi_{\text{с}}) + kU_{\text{п}}(nT) \cos[(\omega_{\text{п}}nT + \varphi_{\text{п}}(nT))], \end{aligned} \quad (3)$$

где T – период следования импульсов аддитивной смеси; k – коэффициент пропорциональности, $n = 0, 1, 2, \dots$

В системах СДЦ с внешней когерентностью суммарный сигнал (3) перед межпериодной обработкой детектируется. Пусть для выполнения данной операции используется квадратичный детектор, на выходе которого формируется периодическая последовательность видеоимпульсов аддитивной смеси пассивной помехи и полезного сигнала

$$u_{\text{д}}(nT) = 0,5 \left\{ k^2 U_{\text{п}}^2(nT) + \right.$$

$$+ U_c^2 + 2kU_cU_{\Pi}(nT) \cos[(\omega_{\Pi} - \omega_c)nT + \varphi_{\Pi}(nT) - \varphi_c] \}. \quad (4)$$

Систему СДЦ представим в виде двукратного вычитающего устройства, алгоритм работы которого определяется соотношением [9]:

$$u_{\text{чпв}}(t) = u_{\text{д}}(t) - 2u_{\text{д}}(t - T) + u_{\text{д}}(t - 2T).$$

После несложных преобразований можно получить следующие выражения для мощности пассивной помехи и полезного сигнала на выходе рассматриваемого устройства:

$$P_{\Pi} = 0,25k^4\sigma_{\Pi}^4[6 - 8R_0^2(T) + 2R_0^2(2T)],$$

$$P_c = \frac{\pi}{8}k^2U_c^2\sigma_{\Pi}^2\{6 - 8R_0(T)\cos[(\omega_{\Pi} - \omega_c)T] + 2R_0(2T)\cos[2(\omega_{\Pi} - \omega_c)T]\},$$

где $R_0(\tau)$ – коэффициент корреляции пассивной помехи.

Коэффициент подавления пассивной помехи рассматриваемой системой СДЦ можно определить следующим соотношением:

$$K_{\Pi} = \frac{4k^4\sigma_{\Pi}^4}{P_{\Pi}} = \frac{16}{[6 - 8R_0^2(T) + 2R_0^2(2T)]},$$

а коэффициент подпомеховой видимости находится из выражения

$$K_{\text{пв}} = \frac{P_c}{P_{\Pi}} = \frac{\pi U_c^2 \{6 - 8R_0(T)\cos[(\omega_{\Pi} - \omega_c)T] + 2R_0(2T)\cos[2(\omega_{\Pi} - \omega_c)T]\}}{0,5k^2\sigma_{\Pi}^2[6 - 8R_0^2(T) + 2R_0^2(2T)]}.$$

Для оценки эффективности рассматриваемой системы СДЦ примем гауссову модель огибающей коэффициента корреляции пассивной помехи на входе квадратичного детектора [7, 8]:

$$R_0(\tau) = \exp[-(\Delta\omega_{\Pi}\tau)^2/2],$$

где $\Delta\omega_{\Pi}$ – ширина энергетического спектра пассивной помехи.

Результаты расчетов коэффициента подавления пассивной помехи K_{Π} в зависимости от ширины энергетического спектра пассивной помехи $\Delta f_{\Pi} = \Delta\omega_{\Pi}/2\pi$, $T = 0,2$ мс представлены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что расширение энергетического спектра пассивной помехи приводит к достаточно резкому уменьшению коэффициента подавления пассивной помехи.

На рис. 6 показаны результаты расчетов коэффициента подпомеховой видимости $K_{\text{пв}}$ в зависимости от ширины энергетического спектра пассивной помехи Δf_{Π} для случая отношения $U_c/\sigma_{\Pi} = -20$ дБ, $T = 0,2$ мс, $k = 1$ для различных значений относительного фазового сдвига $\Delta\omega T$.

На рис. 7 представлены результаты расчетов коэффициента подпомеховой видимости $K_{\text{пв}}$ в зависимости от отношения U_c/σ_{Π} на входе системы СДЦ для случая $T = 0,2$ мс, $k = 1$, относительном фазовом сдвиге $\Delta\omega T = \pi$ для различных значений ширины энергетического спектра пассивной помехи Δf_{Π} .

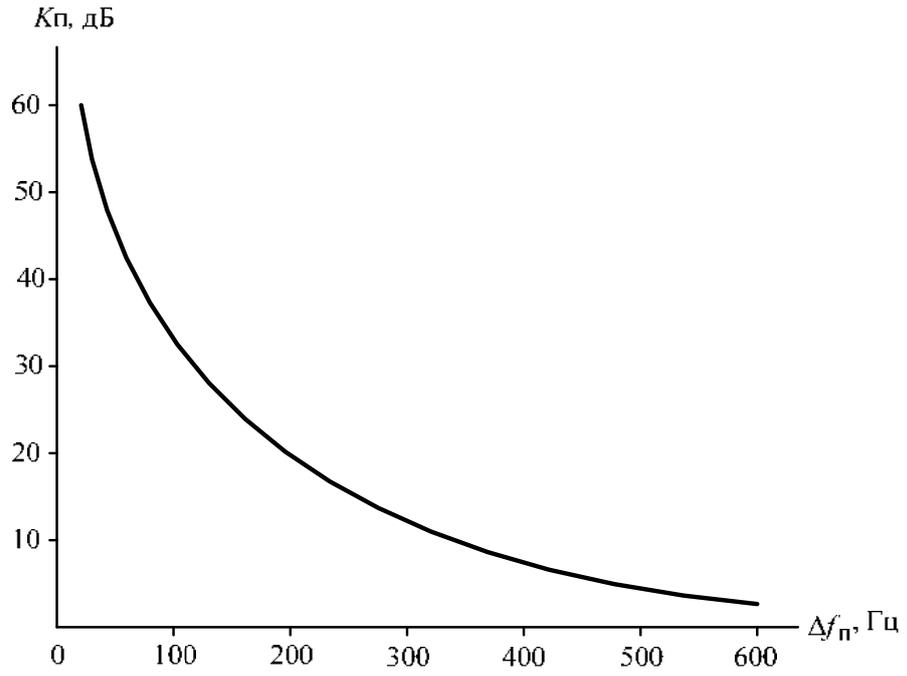


Рис. 5. Коэффициент подавления пассивной помехи

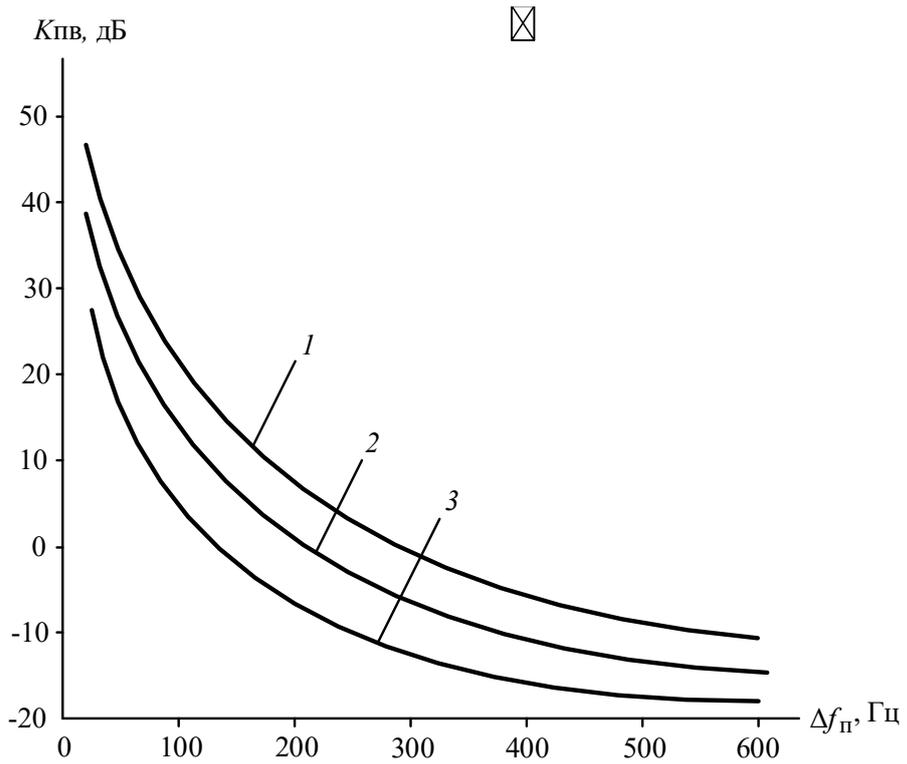


Рис. 6. Коэффициент подпомеховой видимости:
1 – $\Delta\omega T = \pi$; 2 – $\Delta\omega T = 0,4 \pi$; 3 – $\Delta\omega T = 0,2 \pi$

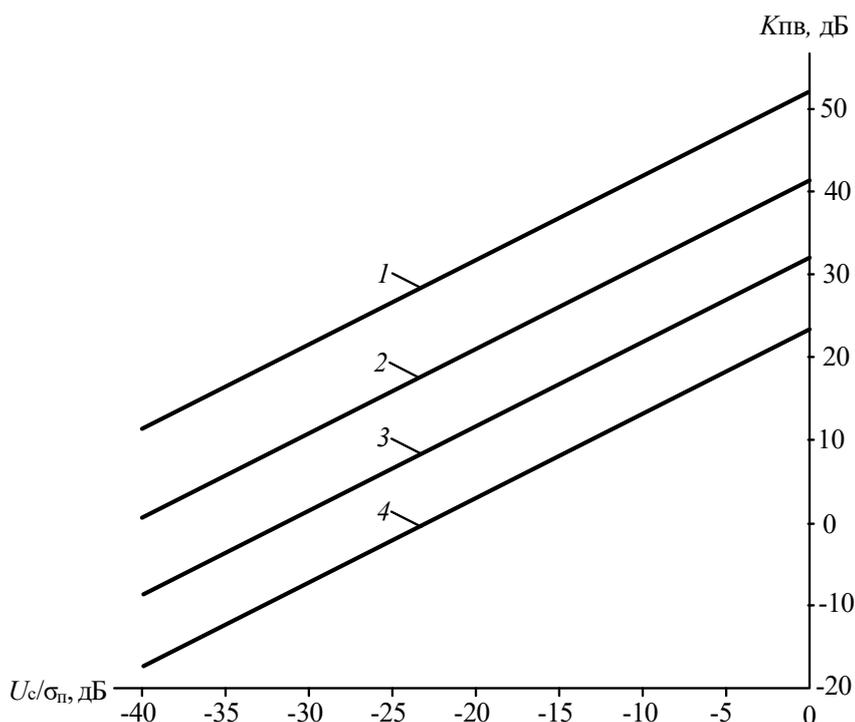


Рис. 7. Коэффициент подпомеховой видимости:
 1 – $\Delta f_n = 50$ Гц; 2 – $\Delta f_n = 100$ Гц; 3 – $\Delta f_n = 150$ Гц; 4 – $\Delta f_n = 250$ Гц

Обсуждение результатов

Из проведенных исследований следует, что использование узкополосного фильтра в тракте обработки сигнала позволяет устранить нарушение работы бортовой системы СДЦ с внешней когерентностью при разрывном характере пассивной помехи. Выходной сигнал узкополосного фильтра позволяет сохранить все статистические свойства предшествующей разрыву пассивной помехи. При этом показано, что расширение спектра пассивной помехи приводит к достаточно резкому снижению эффективности рассмотренной системы СДЦ. Так, при изменении ширины спектра пассивной помехи от 50 до 600 Гц при $T = 0,2$ мс коэффициент подавления пассивной помехи уменьшается с 60 до 4 дБ. При этом подпомеховая видимость как отношение сигнал/помеха на выходе системы СДЦ зависит не только от ширины спектра пассивной помехи, но и от частоты Доплера полезного сигнала, отраженного от движущейся цели. При ширине спектра пассивной помехи 100 Гц изменение фазового сдвига полезного сигнала за период зондирования с π до $0,2\pi$ приводит к уменьшению коэффициента подпомеховой видимости с 20 до 3 дБ. Одновременно для фазового сдвига полезного сигнала за период зондирования, равный π , расширение спектра пассивной помехи от 50 до 200 Гц обуславливает падение коэффициента подпомеховой видимости с 45 до 5 дБ.

Заключение

Разрывный характер отражений от подстилающей поверхности срывает нормальную работу бортовой системы СДЦ с внешней когерентностью. Дли-

тельность разрывов пассивной помехи может колебаться от единиц до нескольких десятков микросекунд и более. Предложенный в работе метод заполнения разрывов пассивной помехи выходным сигналом узкополосного фильтра позволяет восстановить режим внешней когерентности без изменения статистических характеристик пассивной помехи. Рассмотренный в статье материал будет полезен при разработке бортовых систем обнаружения движущихся на фоне подстилающей поверхности целей.

Список литературы

1. Ботов М. И., Вяхирев В. А., Девотчак В. В. Введение в теорию радиолокационных систем. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 394 с.
2. Филиппов Б. И. Радиотехнические системы. Новосибирск : НГТУ, 2015. 386 с.
3. Казаринов Ю. М., Коломинский Ю. А., Кутузов В. М., Леонтьев В. В. Радиотехнические системы. М. : Академия, 2008. 592 с.
4. Справочник по радиолокации : в 2 кн. / под ред. М. И. Скольника. М. : Техносфера, 2015. Кн. 1. 680 с.
5. Попов Д. И. Адаптация нерекурсивных режекторных фильтров // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2009. № 4. С. 46–55. doi: 10.20535/S0021347009040050
6. Котоусов А. С., Морозов А. К. Оптимальная фильтрация и компенсация помех. М. : Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.
7. Зиятдинов С. И. Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 3. С. 6–8. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-6-9
8. Зиятдинов С. И., Осипов Л. А. Подавление коррелированных помех адаптивными режекторными фильтрами при модуляции периода повторения импульсов // Информационно-управляющие системы. 2021. № 3. С. 53–60. doi: 10.31799/1684-8853-2021-3-53-60
9. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М. : Радиотехника, 2004. 319 с.
10. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : URS, 2016. 915 с.
11. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М. : Радио и связь, 1986. 512 с.

References

1. Botov M.I., Vyakhirev V.A., Devotchak V.V. *Vvedenie v teoriyu radiolokatsionnykh sistem = Introduction to radar systems theory*. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012:394. (In Russ.)
2. Filippov B.I. *Radiotekhnicheskie sistemy = Radio engineering systems*. Novosibirsk: NGTU, 2015:386. (In Russ.)
3. Kazarinov Yu.M., Kolominskiy Yu.A., Kutuzov V.M., Leont'ev V.V. *Radiotekhnicheskie sistemy = Radio engineering systems*. Moscow: Akademiya, 2008:592. (In Russ.)
4. Skolnik M.I. (ed.). *Spravochnik po radiolokatsii: v 2 kn. = Radar handbook: in 2 books*. Moscow: Tekhnosfera, 2015;Bk.1:680. (In Russ.)
5. Popov D.I. Adaptation of non-recursive notch filters. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radio electronics*. 2009(4):46–55. (In Russ.). doi: 10.20535/S0021347009040050
6. Kotousov A.S., Morozov A.K. *Optimal'naya fil'tratsiya i kompensatsiya pomekh = Optimal filtering and interference compensation*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2008:166. (In Russ.)
7. Ziatdinov S.I. The influence of mismatch of quadrature channel parameters on the operation of an adaptive moving target selection system. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika =*

- University proceedings. Radio electronics.* 2020;23(3):6–8. (In Russ.). doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-3-6-9
8. Ziatdinov S.I., Osipov L.A. Suppression of correlated interference by adaptive notch filters with pulse repetition period modulation. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and management systems.* 2021;(3):53–60. (In Russ.). doi: 10.31799/1684-8853-2021-3-53-60
 9. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy = Radar systems.* Moscow: Radiotekhnika, 2004:319. (In Russ.)
 10. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly = Radio engineering circuits and signals.* Moscow: URS, 2016:915. (In Russ.)
 11. Gonorovskiy I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly = Radio engineering circuits and signals.* Moscow: Radio i svyaz', 1986:512. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Ильич Зиаудинов

доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
информационных систем и технологий,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения (Россия, г. Санкт-
Петербург, ул. Большая Морская, 67)

E-mail: ziat.53@mail.ru

Sergey I. Ziatdinov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of information systems and technologies,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation (67 Bolshaya
Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Ольга Ивановна Красильникова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
систем и технологий,
Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения (Россия, г. Санкт-
Петербург, ул. Большая Морская, 67)

E-mail: oikrasilnikova@yandex.ru

Olga I. Krasilnikova

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of information
systems and technologies, Saint Petersburg
State University of Aerospace
Instrumentation (67 Bolshaya Morskaya
street, Saint Petersburg, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 28.04.2025

Принята к публикации / Accepted 22.05.2025

УДК 621.3.014.4

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Особенности обработки сигнала вихретокового датчика

А. Г. Дмитриенко¹, К. А. Семкина², Н. С. Ульянин³, Б. В. Цыпин⁴

^{1,2,3}Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{1,2,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹info@niifi.ru, ²po444t@mail.ru, ³kolianul@mail.ru, ⁴cyпин@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Токовихревые датчики нашли широкое распространение для решения различных технических задач. Эффективность использования датчиков зависит от применяемого способа обработки его выходного сигнала. Целью работы является исследование возможностей измерения по частоте выходного сигнала датчика, включенного в автогенераторную схему. *Материалы и методы.* Выполнено математическое моделирование данного способа и его сравнение с традиционным способом измерения по амплитуде выходного сигнала. Проведено моделирование глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля с помощью программы ELCUT. *Результаты.* Получены зависимости параметров датчика от расстояния до объекта контроля и рабочей частоты датчика. *Вывод.* Результаты исследования подтвердили эффективность применения автогенераторной схемы включения токовихревого датчика и показали, что рабочий диапазон датчика при диаметре катушки индуктивности 15 мм составляет не более 7 мм.

Ключевые слова: токовихревой датчик, измерение расстояния до объекта, автогенераторная схема, моделирование, программа ELCUT

Для цитирования: Дмитриенко А. Г., Семкина К. А., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Особенности обработки сигнала вихретокового датчика // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 52–63. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Features of eddy current sensor signal processing

A.G. Dmitrienko¹, K.A. Semkina², N.S. Ulyanin³, B.V. Tsypin⁴

^{1,2,3}Scientific-research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{1,2,4}Penza State University, Penza, Russia

¹info@niifi.ru, ²po444t@mail.ru, ³kolianul@mail.ru, ⁴cyпин@yandex.ru

Abstract. *Background.* Current-vortex sensors are widely used to solve various technical problems. The efficiency of using sensors depends on the method used to process its output signal. The purpose of the work is to study the possibilities of measuring the frequency of the output signal of a sensor included in an auto-generator circuit. *Materials and methods.* Mathematical modeling of this method and its comparison with the traditional method of measuring the amplitude of the output signal are performed. The depth of penetration and distribution of eddy currents in a conductive object at different frequencies of an alternating magnetic field is modeled using the ELCUT program. *Results.* The dependences of the sensor parameters on the distance to the monitoring object and the operating frequency of the sensor are obtained. *Conclusion.* The results of the study showed the effectiveness of using

an autogenerator circuit for switching on a current-vortex sensor and showed that the operating range of the sensor with an inductor diameter of 15 mm is no more than 7 mm.

Keywords: current vortex sensor, measuring the distance to an object, auto-generator circuit, modeling, ELCUT program

For citation: Dmitrienko A.G., Semkina K.A., Ulyanin N.S., Tsylin B.V. Features of eddy current sensor signal processing. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):52–63. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-5

Введение

Метод вихретокового контроля основан на измерении параметров сигнала, зависящего от взаимодействия переменного электромагнитного поля датчика с электропроводящим объектом контроля.

Достоинством метода является отсутствие непосредственного механического контакта между датчиком и объектом контроля.

Метод применяют для оценки поверхностных и подповерхностных дефектов, для измерения толщины покрытий или слоев, определения электрической проводимости и магнитной проницаемости материала, оценки металлургических, механических и других свойств изделия. С помощью метода также можно определять параметры вибрации токопроводящих деталей и узлов [1].

Обычно при работе с вихретоковыми датчиками производят измерение интенсивности или амплитуды его выходного сигнала.

В настоящей работе рассмотрена возможность оценки контролируемых параметров по частоте выходного сигнала вихретокового датчика, включенного в автогенераторную схему [2, 3].

Ранее эти вопросы были кратко изложены в докладе «Оптимизация структуры обработки сигнала вихретокового датчика» [4].

Обработка сигнала вихретокового датчика

При обработке сигнала вихретокового датчика требуется выделение информации о контролируемом объекте на фоне мешающих факторов [5].

Применяют два способа отстройки от мешающих факторов. Первый заключается в стабилизации условий контроля. Значение мешающего фактора требуется стабилизировать по всему объекту контроля во всех режимах измерения [6].

Когда известно, на какой параметр выходного сигнала влияет мешающий фактор, становится возможным применение второго способа. Мешающим, неинформативным фактором может быть амплитуда, частота или фаза выходного сигнала датчика. Способ заключается в подавлении мешающего фактора или в выделении полезной информации.

В случае, когда изменения мешающего фактора влияют на амплитуду сигнала, применяют фазовый способ выделения информации, основанный на сравнении фаз двух входных сигналов близких частот.

В случае, когда изменения мешающего фактора влияют на фазу выходного сигнала, применяют амплитудный способ. Принцип амплитудного способа обработки сигнала поясняет рис. 1.

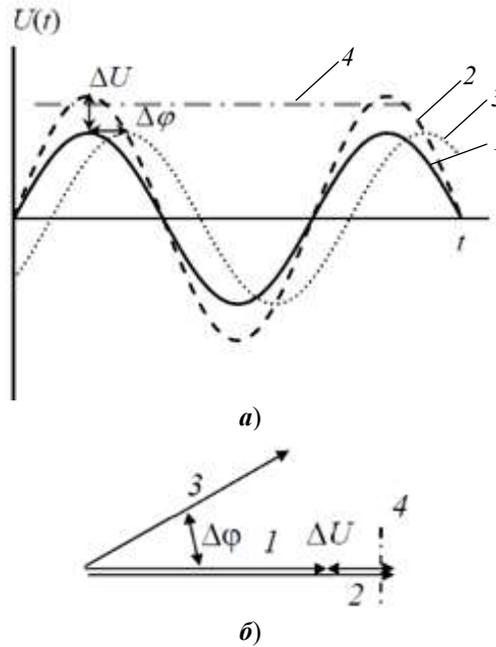


Рис. 1. Принцип амплитудного способа выделения информации:
a – изменения синусоидального выходного сигнала датчика;
б – изменения сигнала, выраженные в векторной форме:
1 – при отсутствии влияющих факторов; **2** – вызванные дефектом;
3 – вызванные мешающим фактором; **4** – порог сигнализации

В случае неоднозначного влияния на параметры сигнала дефекта и мешающих факторов используют комбинированный амплитудно-фазовый способ. При амплитудно-фазовом способе выделяют составляющую выходного сигнала датчика, ортогональную напряжению мешающего фактора, на рис. 1,**б** она перпендикулярна вектору 3.

Принцип выделения полезного сигнала амплитудно-фазовым способом поясняет рис. 2.

Частотный метод предполагает включение вихретокового преобразователя в колебательный контур автогенератора. Информация об измеряемом параметре в этом случае содержится в частоте выходного сигнала датчика.

Сравнительный анализ амплитудного и частотного методов обработки выходного сигнала датчика

Сравнение методов проведем на примере измерения расстояния между парамагнитным алюминиевым объектом контроля (мишенью) и вихретоковым датчиком.

Схема частотного способа измерения приведена на рис. 3. Датчик представлен в виде последовательного колебательного контура с емкостью 100 пФ и начальным значением индуктивности при $S = 0$, равным 8,5128 мкГн (значения соответствуют параметрам датчика, изготовленного для проведения эксперимента), что соответствует резонансной частоте 5,4549 МГц. Расстояние S от объекта до датчика влияет на индуктивность L катушки датчика и, соответственно, на частоту F автоколебаний генератора.

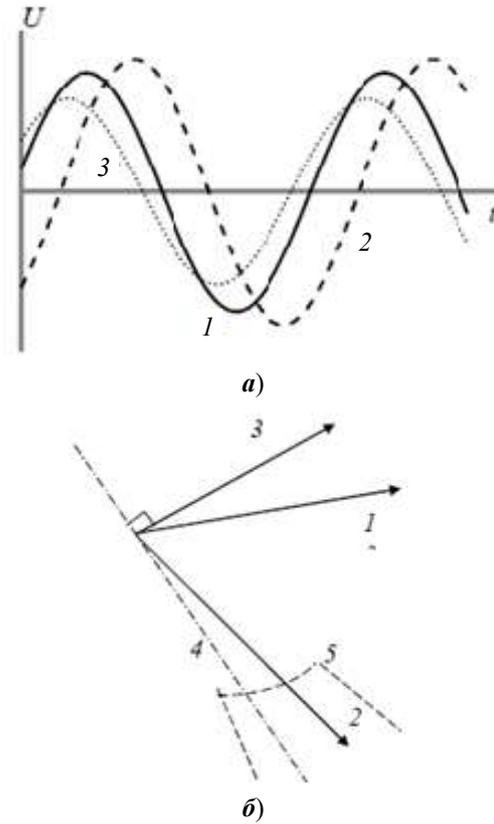


Рис. 2. Принцип выделения полезного сигнала амплитудно-фазовым способом [3]:
a – временная развертка; **б** – векторная диаграмма амплитудно-фазового способа
 подавления мешающего фактора: 1 – при отсутствии влияющих факторов;
 2 – под воздействием дефекта; 3 – под воздействием мешающего фактора;
 4 – направление, перпендикулярное вектору мешающего фактора;
 5 – порог срабатывания дефектоскопа

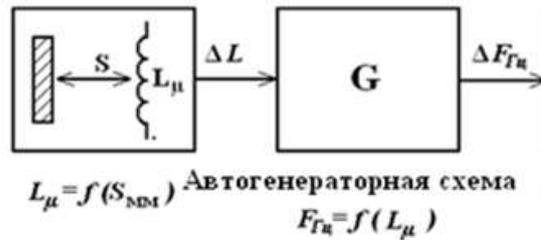


Рис. 3. Схема частотного способа измерения

В табл. 1 показана зависимость индуктивности L и частоты F и ее изменения ΔF на каждом участке перемещения от изменения расстояния S в пределах от 0 до 12 мм [4].

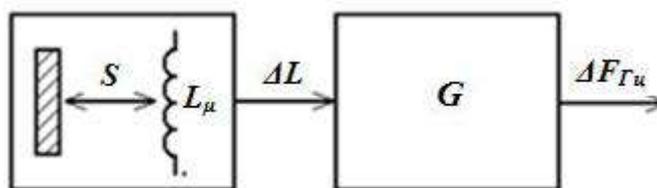
Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением расстояния между датчиком и объектом контроля чувствительность метода уменьшается.

Схема амплитудного способа измерения приведена на рис. 4.

Таблица 1

Зависимость индуктивности L , частоты F и ее изменения ΔF от расстояния S для алюминиевой модели объекта контроля [4]

Величина перемещения S , мм	Индуктивность L , мкГн	F , кГц	ΔF , Гц
0,00	7,0258	6004,44	
1,20	7,4444	5833,18	171258
2,40	7,7342	5722,85	110328
3,60	7,9442	5646,70	76147
4,80	8,1008	5591,86	54846
6,00	8,2187	5551,61	40253
7,20	8,3095	5521,19	30415
8,40	8,3797	5498,01	23175
9,60	8,4348	5480,03	17987
10,80	8,4780	5466,05	13980
12,00	8,5128	5454,86	11184



Автогенераторная схема

$$L_{\mu} = f(S_{\text{мм}}) \quad F_{\text{Гц}} = f(L_{\mu})$$

Рис. 4. Схема амплитудного способа измерения

Измерение индуктивности катушки датчика производится на фиксированной частоте. Для измерения индуктивности используется схема измерительного моста. В ней $L_1 = 7,0258$ мкГн – опорная индуктивность, равная начальному значению индуктивности обмотки датчика L_2 при $S = 0$. Сопротивления $R_1 = R_2 = 220$ Ом образуют остальные плечи мостовой схемы.

Выходное напряжение диагонали моста равно:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} R \left(\frac{1}{R + 2\pi f L_1} - \frac{1}{R + 2\pi f L_2} \right),$$

где напряжение $U_{\text{пит}} = 5$ В – переменное напряжение питания диагонали моста частоты $f = 5$ МГц. Зависимости индуктивности L_2 , выходного напряжения мостовой схемы $U_{\text{вых}}$ и его изменения ΔU от перемещения S представлены в табл. 2. Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что с увеличением расстояния между датчиком и объектом контроля чувствительность метода уменьшается аналогично частотному способу измерения.

Таблица 2

Зависимость индуктивности L , выходного напряжения измерительного моста $U_{\text{вых}}$ и его изменения $\Delta U_{\text{вых}}$ от перемещения S [4]

Перемещения S , мм	Индуктивность L , мкГн	$U_{\text{вых}}$, В	$\Delta U_{\text{вых}}$, В
0,00	7,0258	0	
1,20	7,4444	0,0723	0,0723
2,40	7,7342	0,1199	0,0476
3,60	7,9442	0,1533	0,0334
4,80	8,1008	0,1776	0,0243
6,00	8,2187	0,1956	0,0180
7,20	8,3095	0,2092	0,0136
8,40	8,3797	0,2196	0,0104
9,60	8,4348	0,2278	0,0082
10,80	8,4780	0,2341	0,0063
12,00	8,5128	0,2392	0,0051

Сопоставим частотный и амплитудный способы измерения расстояния S от токовихревого датчика до мишени с помощью оценки возможности измерения выходных величин типовым микроконтроллером.

При измерении максимальной выходной частоты сигнала датчика, равной 6 МГц, за 1 с можно получить $6 \cdot 10$ единиц выходного кода в 6 импульсах, используемых для измерения. В конце диапазона измерения при расстоянии $S = 12$ мм чувствительность составляет $\Delta = 1277/1,2 \approx 1000$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность 0,1 %.

В тех же условиях в начале диапазона чувствительность составляет $\Delta = 16643/1,2 \approx 13900$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность $\delta = 100/13900 \approx 0,007$ %.

При измерении напряжения типовой микроконтроллер обеспечивает $2^{12} = 4096$ единиц выходного кода. В конце диапазона измерения чувствительность составляет $\Delta = 87/1,2 \approx 70$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность 1,7 %. В начале диапазона чувствительность составляет $\Delta = 1238/1,2 \approx 1032$ [единиц/мм]. Ошибке измерения ± 1 дискретности соответствует относительная погрешность $\delta = 100/1032 \approx 0,1$ %.

Таким образом, чувствительность амплитудного способа измерения в $1000/70 \approx 14$ раз ниже в конце диапазона измерения и в $13900/1032 \approx 13,5$ раза ниже в начале диапазона. Погрешность амплитудного способа измерения в конце диапазона в 17 раз выше, а в начале диапазона выше в 14 раз.

Проведенный сравнительный анализ математических моделей и оценка возможности измерения выходных величин типовым микроконтроллером показали существенное преимущество частотного принципа измерения перемещения по сравнению с аналоговым методом.

Моделирование параметров вихретокового датчика с помощью программы ELCUT

Анализ глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля позволяет выявить требования к параметрам токовихревого датчика.

Для исследования удобно использовать программу ELCUT, предназначенную для двумерного моделирования методом конечных элементов [8]. Программа позволяет определить распределение вихревых токов в проводящем теле от воздействия переменного магнитного поля при различной его частоте. Благодаря программе ELCUT возможно определить необходимую индуктивность катушки датчика в зависимости от расстояния до объекта (мишени).

Рассмотрим распределение вихревых токов в алюминиевой пластине в зависимости от частоты переменного магнитного поля, и определим зависимость индуктивности катушки датчика от перемещения мишени на расстояние до 25 мм. В качестве исходных данных для моделирования примем, что внешний диаметр катушки индуктивности датчика составляет 15 мм, диаметр мишени 100 мм, а ее толщина 5 мм. Сила переменного тока в катушке 0,01 А.

На рис. 5 приведены полученные в результате моделирования конфигурации распределения вихревых токов в толщине проводящего объекта на разной частоте переменного магнитного поля.

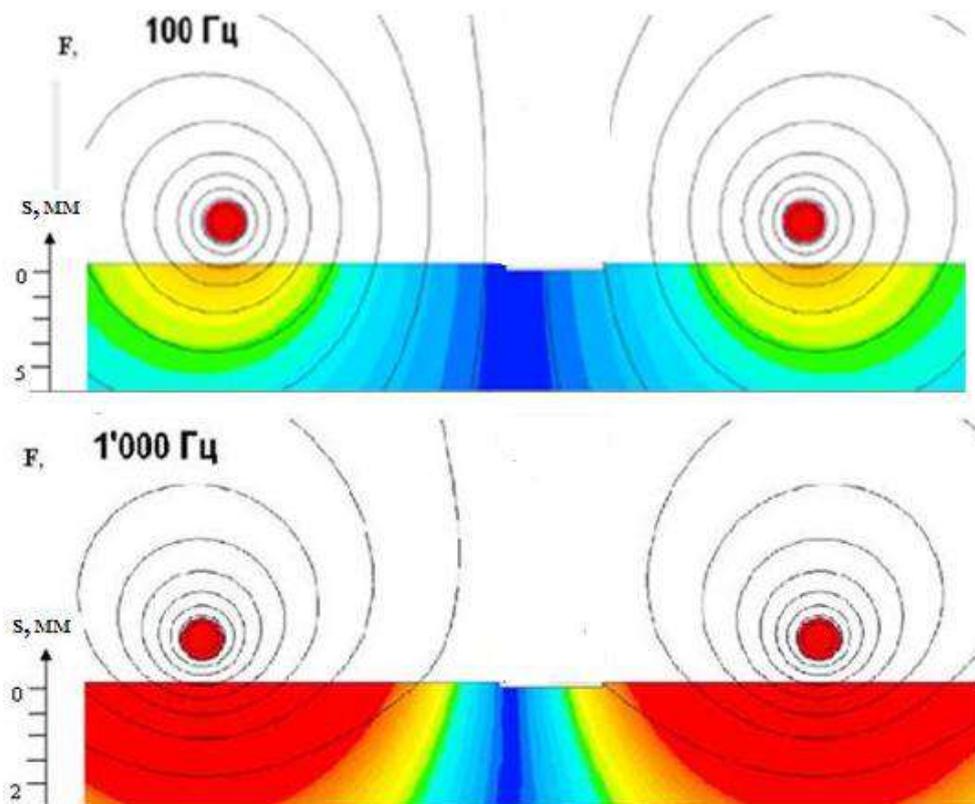


Рис. 5. Распределение вихревых токов в мишени при различной частоте переменного магнитного поля [8]: F – частота переменного магнитного поля; s – толщина проводящего объекта

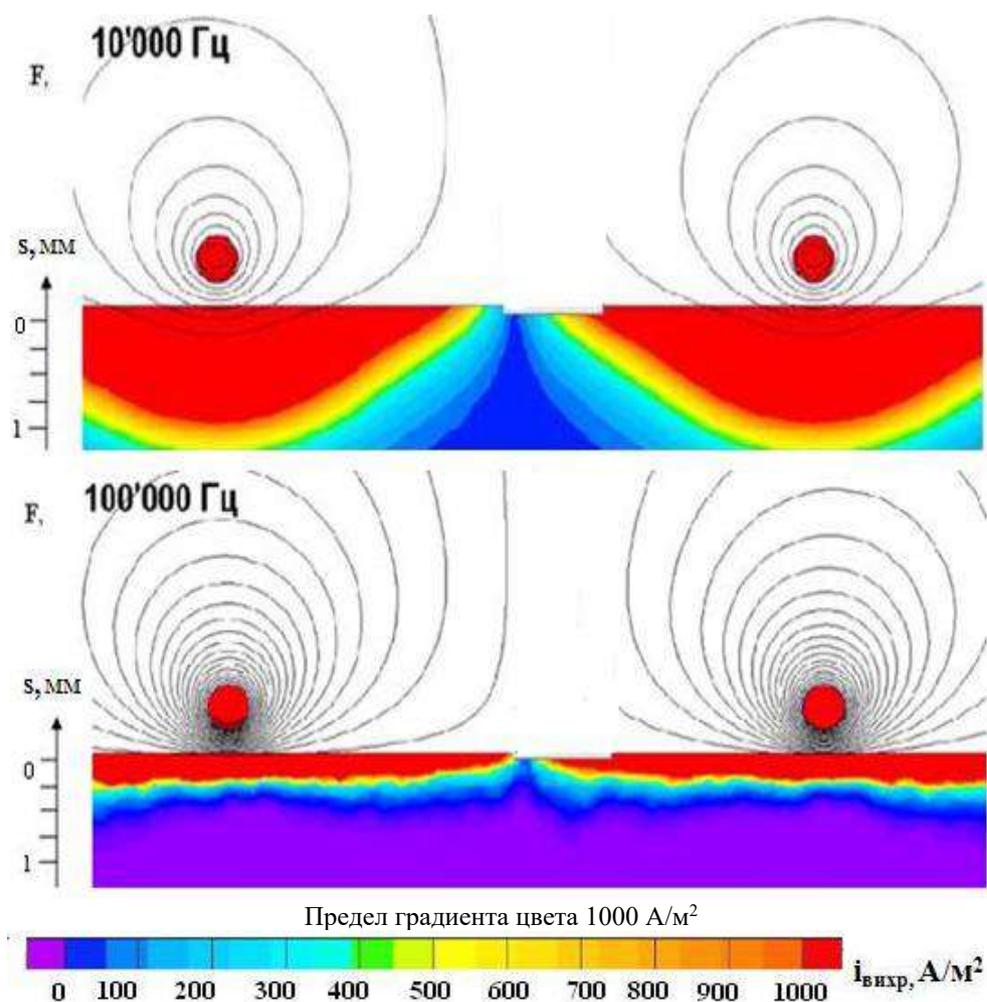


Рис. 5. Окончание

С увеличением частоты возрастает концентрация вихревых токов ближе к поверхности со стороны источника поля, концентрируются вихревые токи в основном под проводом. В результате моделирования выявлены два максимума концентрации вихревых токов ввиду представления катушки индуктивности в среде программы ELCUT как среза витка медного провода, на который мы смотрим сбоку.

Программа позволяет подробно изучить связанные с вихревыми токами явления и определить численные значения вихревых токов. На рис. 6 приведен график зависимости потокосцепления катушки индуктивности в зависимости от расстояния до мишени, полученный на основании моделирования в программе ELCUT.

Численные значения потокосцепления и индуктивности катушки в зависимости от перемещения приведены в табл. 3. График позволяет сделать вывод о том, что при диаметре катушки индуктивности 15 мм датчик будет эффективно работать на расстоянии не более 7 мм до мишени.

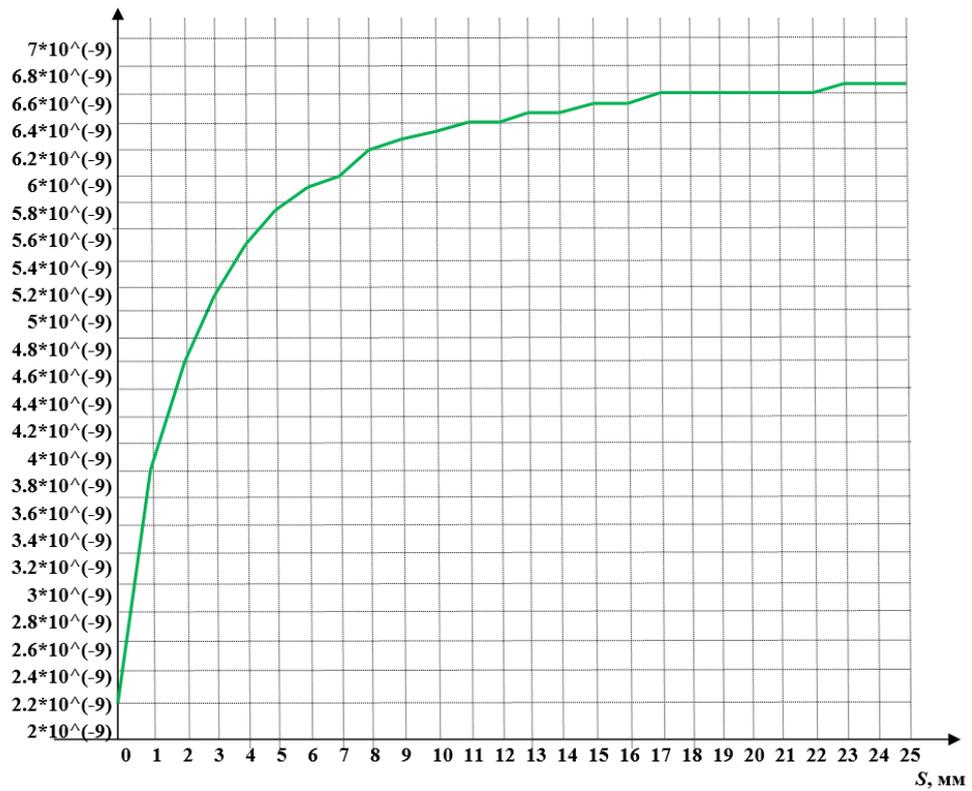


Рис. 6. График зависимости потокосцепления катушки индуктивности от перемещения алюминиевой проводящей мишени на расстояние 25 мм [9]

Таблица 3

Потокоцепление и индуктивность катушки в зависимости от расстояния до алюминиевой мишени

$S, \text{ мм}$	$\Psi, \text{ Вб}$	$L, \text{ Гн}$	$S, \text{ мм}$	$\Psi, \text{ Вб}$	$L, \text{ Гн}$
0	2,2469E-09	2,2469E-07	13	6,4525E-09	6,4525E-07
1	3,8537E-09	3,8537E-07	14	6,4484E-09	6,4484E-07
2	4,643E-09	4,643E-07	15	6,5061E-09	6,5061E-07
3	5,1369E-09	5,1369E-07	16	6,5237E-09	6,5237E-07
4	5,5051E-09	5,5051E-07	17	6,5429E-09	6,5429E-07
5	5,7289E-09	5,7289E-07	18	6,5571E-09	6,5571E-07
6	5,9233E-09	5,9233E-07	19	6,5691E-09	6,5691E-07
7	6,0316E-09	6,0316E-07	20	6,5812E-09	6,5812E-07
8	6,1795E-09	6,1795E-07	21	6,5893E-09	6,5893E-07
9	6,2624E-09	6,2624E-07	22	6,5782E-09	6,5782E-07
10	6,3248E-09	6,3248E-07	23	6,6074E-09	6,6074E-07
11	6,3666E-09	6,3666E-07	24	6,6115E-09	6,6115E-07
12	6,3958E-09	6,3958E-07	25	6,6161E-09	6,6161E-07

Заключение

Эффективность работы вихретокового датчика зависит от используемого способа обработки выходного сигнала. Могут применяться фазовый, амплитудный или частотный способы.

Обычно применяют измерения по амплитуде, но проведенные исследования [2, 3, 7] показывают, что при включении датчика в автогенераторную схему измерения частоты выходного сигнала позволяют получить лучшие результаты по сравнению с традиционно используемым измерением амплитуды выходного сигнала.

Проведенное моделирование в среде ELCUTE глубины проникновения и распределения вихревых токов в проводящем объекте при различной частоте переменного магнитного поля подтвердило полученные результаты. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными данными [2].

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Нефедьев Д. И., Трофимов А. А. Вихретоковые чувствительные элементы для бесконтактных датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 1. С. 4–10.
2. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Модель стабилизации вихретоковых датчиков перемещения // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 3. С. 58–68. doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
3. Жуков В. К., Мильяев Д. В. Смешанное включение токовихревого датчика // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова : сб. факультета автоматики и вычислительной техники. Томск : Изд-во Томского университета, 1969.
4. Новиков В. Н., Ульянин Н. С., Цыпин Б. В. Оптимизация структуры обработки сигнала вихретокового датчика // Актуальные проблемы РКП и ИТ : сб. докладов ВНТК. М. : АО«РКС», 2018.
5. Бобров А. Л., Власов К. В., Бехер С. А. Основы вихретокового неразрушающего контроля. Новосибирск : СГУПС, 2019. 98 с.
6. Грабовский А. В., Петров Г. А. Многоканальные сканеры вихретокового контроля // Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова. 2016. № 9. С. 42–48.
7. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л. : Энергия, 1968. 248 с.
8. elcut.ru [официальный сайт]. URL: https://elcut.ru/advanced/eddy-current_sensor_r.htm (дата обращения: 16.12.24).

References

1. Dmitrienko A.G., Nefed'ev D.I., Trofimov A.A. Eddy current sensing elements for non-contact displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(1):4–10. (In Russ.)
2. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsypin B.V. Model for stabilization of eddy current displacement sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;(3):58–68. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2018-3-8
3. Zhukov V.K., Milyaev D.V. Mixed inclusion of eddy current sensor. *Izvestiya Tomskogo ordena trudovogo krasnogo znamenii politekhnicheskogo instituta imeni S.M. Kirova: sb. fakul'teta avtomatiki i vychislitel'noy tekhniki = Proceedings of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor Polytechnic Institute named after S.M. Kirov: bulletin of the faculty of automation and computing technology*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo universiteta, 1969. (In Russ.)
4. Novikov V.N., Ul'yanin N.S., Tsypin B.V. Optimization of the structure of processing the signal of the eddy current sensor. *Aktual'nye problemy RKP i IT: sb. докладov VNTK = Actual problems of RCP and IT: collection of reports of VNTK*. Moscow: AO«RKS», 2018. (In Russ.)

5. Bobrov A.L., Vlasov K.V., Bekher S.A. *Osnovy vikhretokovogo nerazrushayushchego kontrolya = Fundamentals of eddy current non-destructive testing*. Novosibirsk: SGUP-Sa, 2019:98. (In Russ.)
6. Grabovskiy A.V., Petrov G.A. Multi-channel eddy current testing scanners. *Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskiy universitet «LETI» im. V.I. Ul'yanova = Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov*. 2016;(9):42–48. (In Russ.)
7. Novitskiy P.V. *Osnovy informatsionnoy teorii izmeritel'nykh ustroystv = Fundamentals of information theory of measuring devices*. Leningrad: Energiya, 1968:248. (In Russ.)
8. *elcut.ru*. Available at: https://elcut.ru/advanced/eddy-current_sensor_r.htm (accessed 16.12.24).

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Геннадиевич Дмитриенко

доктор технических наук, доцент, генеральный директор, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского 8/10); заведующий кафедрой ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: info@niifi.ru

Aleksey G. Dmitrienko

Doctor of engineering sciences, associate professor, general manager, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia); head of the sub-department of rocket, space and aviation instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кристина Александровна Семкина

магистрант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40); специалист, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: po444t@mail.ru

Kristina A. Semkina

Master's degree student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia); specialist, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Николай Сергеевич Ульянин

начальник центра проектирования систем № 1, Научно-исследовательский институт физических измерений (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: kolianul@mail.ru

Nikolai S. Ulyanin

Head of the System Design center No. 1, Scientific-research Institute of physical measurements (8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Борис Вульфович Цыпин

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ракетно-космического и авиационного приборостроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: cypin@yandex.ru

Boris V. Tsy-pin

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of rocket, space and aviation instrument engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 12.05.2025

Принята к публикации / Accepted 08.06.2025

УДК 621.396.96
doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Усовершенствование оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков и исследование ее характеристик

С. М. Зуев¹, И. Ю. Константинов²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
¹Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Усовершенствование оптико-электронных систем актуально для медицины, промышленности и безопасности, где требуются точные и надежные измерения. Инфракрасные датчики, работающие в сложных условиях, являются ключевым элементом сенсоров. Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном подтверждении эффективности усовершенствованной оптико-электронной системы, основанной на инфракрасных датчиках, с улучшенными характеристиками точности, надежности и адаптивности. *Материалы и методы.* В исследовании экспериментально подтверждена эффективность разработанной оптико-электронной системы на основе ИК-датчиков, выполнено теоретическое обоснование выбора компонентов и алгоритмов. Предложен метод динамической калибровки инфракрасных датчиков, минимизирующий температурные и оптические дрейфы. *Результаты и выводы.* Полученные результаты способствуют развитию сенсорных платформ, созданию новых продуктов и повышению точности современных измерительных систем. Использование короткодействующего датчика упростит техническую реализацию и повысит надежность измерений без необходимости сложной обработки сигнала.

Ключевые слова: инфракрасные датчики, оптико-электронные системы, обработка данных, сенсорные технологии, измерения

Для цитирования: Зуев С. М., Константинов И. Ю. Усовершенствование оптико-электронной системы на основе инфракрасных датчиков и исследование ее характеристик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 64–76. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Improvement of an optical-electronic system based on infrared sensors and investigation of its characteristics

S.M. Zuev¹, I.Yu. Konstantinov²

^{1,2}MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
¹The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMI”, Moscow, Russia

¹sergei_zuev@mail.ru, ²indavanes@yandex.ru

Abstract. *Background.* The improvement of optoelectronic systems is relevant for medicine, industry and safety, where accurate and reliable measurements are required. Infrared sensors operating in difficult conditions are a key element of sensors. The purpose of the study is to develop and experimentally validate the effectiveness of an improved optical-electronic system based on infrared sensors with improved characteristics of accuracy, reli-

ability and adaptability. *Materials and methods.* The study experimentally confirmed the effectiveness of the developed optoelectronic system based on IR sensors, and theoretically justified the choice of components and algorithms. A method for dynamic calibration of infrared sensors is proposed, minimizing temperature and optical drifts. *Results and conclusions.* The results obtained contribute to the development of sensor platforms, the creation of new products and the improvement of the accuracy of modern measuring systems. The use of a short-range sensor will simplify the technical implementation and increase the reliability of measurements without the need for complex signal processing.

Keywords: infrared sensors, optoelectronic systems, data processing, sensor technologies, measurements

For citation: Zuev S.M., Konstantinov I.Yu. Improvement of an optical-electronic system based on infrared sensors and investigation of its characteristics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):64–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-6

Введение

Современные системы измерения играют ключевую роль в медицине, промышленности и безопасности, где требуется высокая точность и надежность. Одним из наиболее перспективных направлений является использование оптико-электронных решений на основе инфракрасных (ИК) датчиков, которые обладают способностью работать в условиях, недоступных для традиционных методов. Однако, несмотря на активное развитие ИК-технологий, сохраняются проблемы, связанные с недостаточной точностью измерений, помехоустойчивостью и ограничениями в условиях сложной эксплуатации [1].

Существующие оптико-электронные системы, основанные на ИК-датчиках, сталкиваются с рядом технических и эксплуатационных вызовов: недостаточная точность измерений в условиях изменяющегося фона и освещения [2], ограниченный диапазон измерений и чувствительность датчиков [3], трудности интеграции с интеллектуальными алгоритмами обработки данных [4], низкая адаптивность к различным сценариям эксплуатации [5]. Устранение этих проблем требует совершенствования компонентной базы, разработки новых алгоритмов обработки сигналов и оптимизации взаимодействия ИК-датчиков с вычислительными платформами [6].

Цель исследования заключается в разработке и экспериментальном подтверждении эффективности усовершенствованной оптико-электронной системы, основанной на инфракрасных датчиках [7], с улучшенными характеристиками точности, надежности и адаптивности.

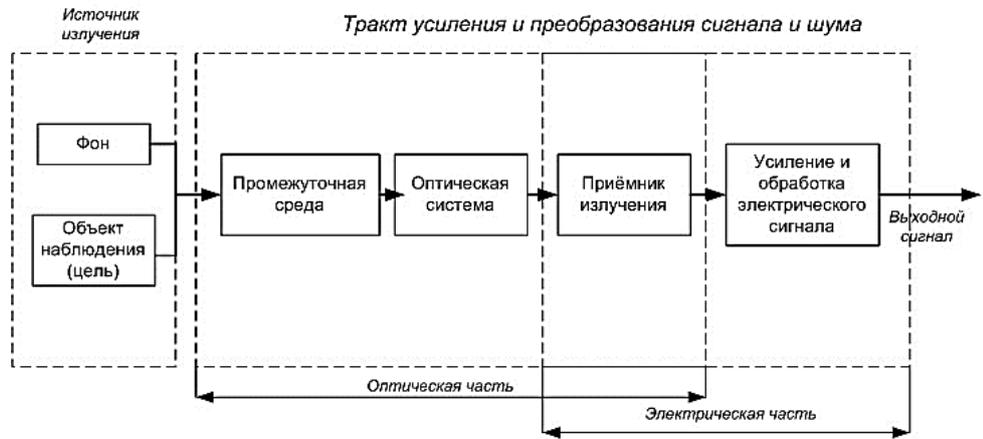
Результаты исследования могут послужить основой для совершенствования существующих сенсорных платформ, повышения функциональности систем на базе ИК-датчиков и разработки новых коммерческих решений [8].

Методология

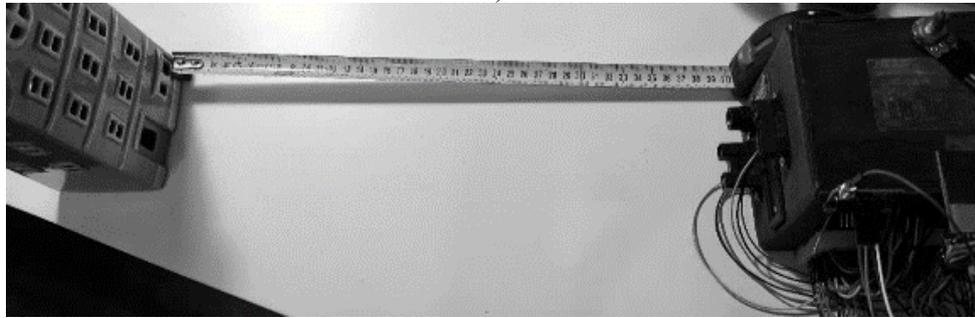
Приведено описание результатов анализа оптико-электронной системы с использованием микроконтроллера ТМ4С123GXL для обработки сигналов инфракрасных датчиков. Общая схема прибора представлена на рис. 1.

Основные этапы исследования включали сбор данных при преобразовании аналоговых сигналов в цифровые, фильтрации методом FIR и сглаживании шумов для повышения точности измерений. Для оценки точности ис-

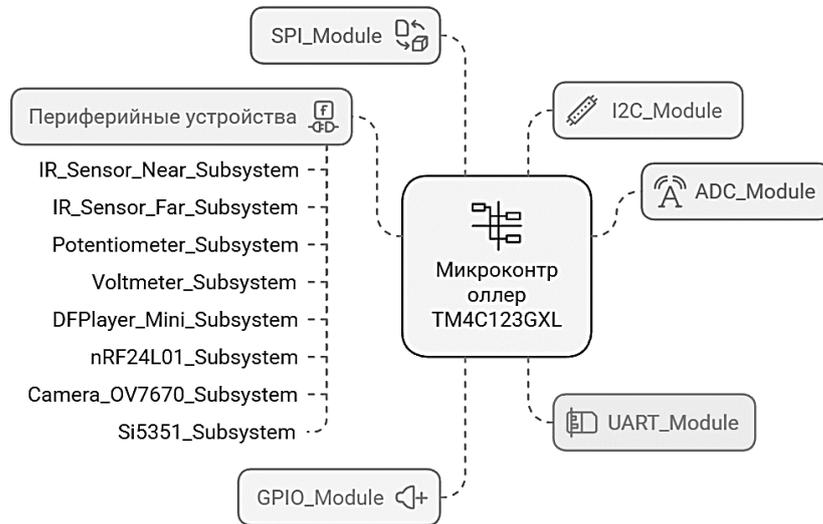
пользовалось сравнение с эталонными значениями, расчет среднеквадратичных ошибок и доверительных интервалов. Разработанная система моделировалась в MATLAB/Simulink с учетом временных задержек и тактовых частот (рис. 2).



а)



б)



в)

Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) опико-электронного прибора; полная схема устройства с использованием микроконтроллера TM4C123GXL (в)

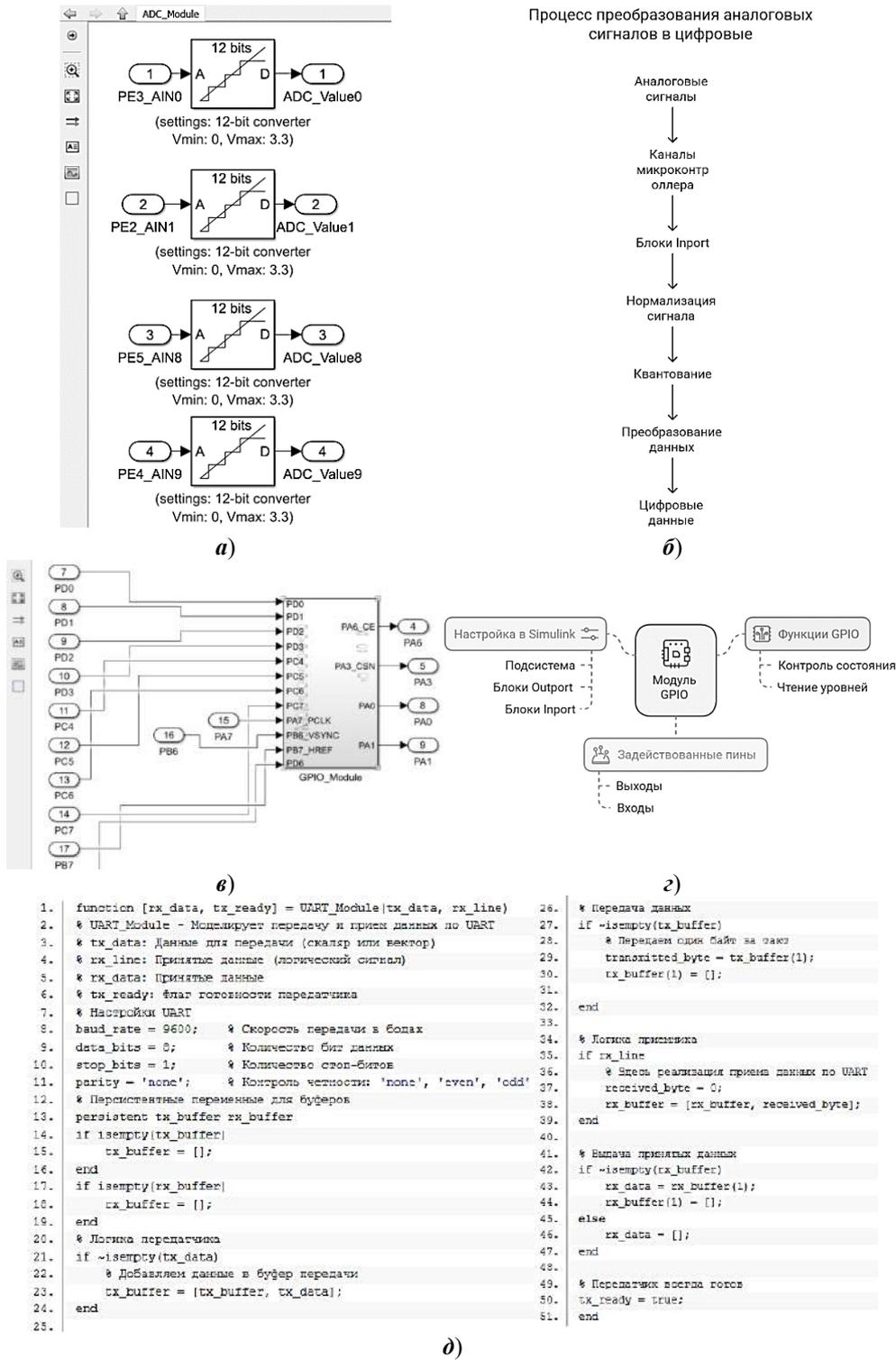


Рис. 2. Аналого-цифровой преобразователь (а); процесс преобразования аналоговых сигналов в цифровые (б); цифровые входы/выходы общего назначения GPIO (в) и блок-схема модуля GPIO (г); реализация программного обеспечения блока MATLAB Function (д)

Определение выходного сигнала приемника при воздействии излучения произвольной формы описывается формулой

$$\frac{dU(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_3}U(t) = \frac{A_0\gamma\epsilon}{C_{кр}c} \left(W(t) - \frac{1}{\tau_T} e^{-\frac{t}{\tau_T}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{\tau_T}} W(\tau) d\tau \right), \quad (1)$$

где τ_3 – электрическая постоянная времени, $\tau_3 = R_{кр}C_{кр}$; τ_T – тепловая постоянная времени кристалла чувствительного элемента, $\tau_T = c / Gnp$; A_0 – величина площади приемной площадки; c – теплоемкость чувствительного элемента; ϵ – диэлектрическая постоянная кристалла.

Анализ характеристик системы позволил выявить критические параметры и оптимизировать алгоритмы обработки сигналов. Для точного определения расстояния до объектов использовались инфракрасные датчики ближнего (10–80 см) и дальнего (20–150 см) действия, работа которых основана на измерении уровня аналогового сигнала (рис. 3).

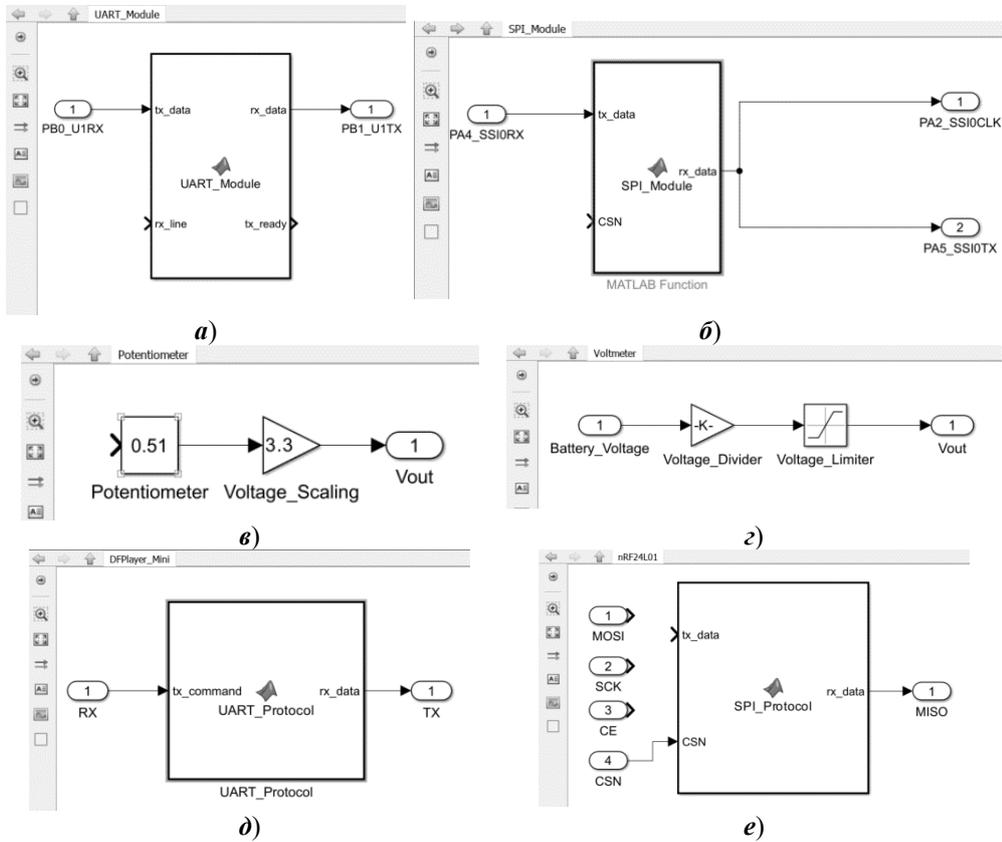


Рис. 3. Последовательный асинхронный интерфейс с модулем UART_Module (а); синхронный последовательный интерфейс SPI (б); потенциометр В10К (в); реализация делителя напряжения Gain с коэффициентом для делителя напряжения, обеспечивающим безопасное измерение напряжения (г); схема подключения аудиомодуля (д); беспроводной модуль nRF24L01 (е); модель двухпроводного интерфейса I2C (ж) и его архитектура (и)

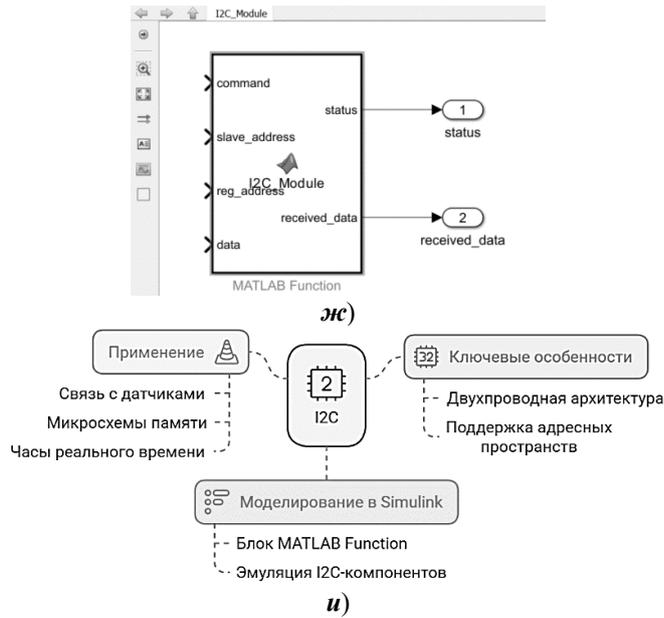


Рис. 3. Окончание

Оцифрованные данные проходили масштабирование и квантование, а затем обрабатывались в соответствии с эмпирической формулой вида

$$\Delta V = \frac{3,3V}{2^{11}} = 0,0008057 \text{ В.} \quad (2)$$

Микроконтроллер TM4C123GXL координировал работу периферийных модулей, включая UART, SPI, I2C и GPIO (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм подключения вольтметра к аналого-цифровому преобразователю микроконтроллера

В Simulink были разработаны подсистемы для моделирования работы каждого интерфейса, а также создана модель работы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (рис. 5).

Важную роль в системе сыграли периферийные устройства: радиомодуль nRF24L01 для беспроводной связи, камера OV7670 для обработки изображений и аудиомодуль DFPlayer Mini для звукового оповещения. Модель и блок-схема возможностей и подключения генератора тактового сигнала

Si5351, инфракрасный датчик расстояния SHARP; входящие в конструкцию исследуемого устройства представлены на рис. 6.

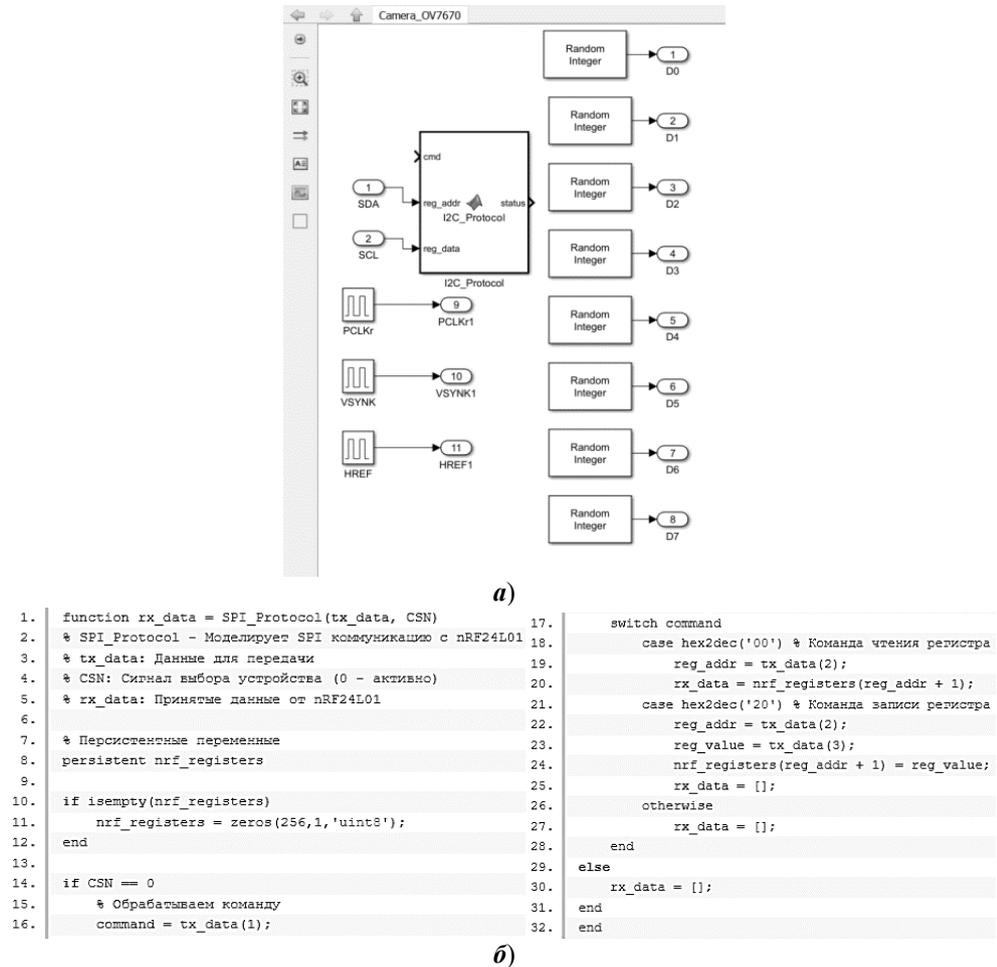


Рис. 5. Схема камеры (а) в Simulink и код из блока I2C_Camera_Control (б)

Таблица 1 содержит основные подключения компонентов системы к микроконтроллеру (МК), включая входы и выходы ИК-датчиков, потенциометра и вольтметра.

Расчет зависимости выходного напряжения инфракрасного датчика от расстояния производится по формуле

$$V_{out} = \frac{A}{Distance + B}, \tag{3}$$

где A и B – коэффициенты, специфичные для модели датчика Gain с коэффициентом для делителя напряжения для обеспечения правильного уровня сигнала для АЦП. Так как датчик выдает напряжение до 5 В, а АЦП микроконтроллера работает с 3,3 В, необходимо добавить блок Gain с коэффициентом, соответствующим делителю напряжения (например, 0,66).

Примененная методология позволила повысить точность измерений, минимизировать ошибки и повысить надежность работы системы.

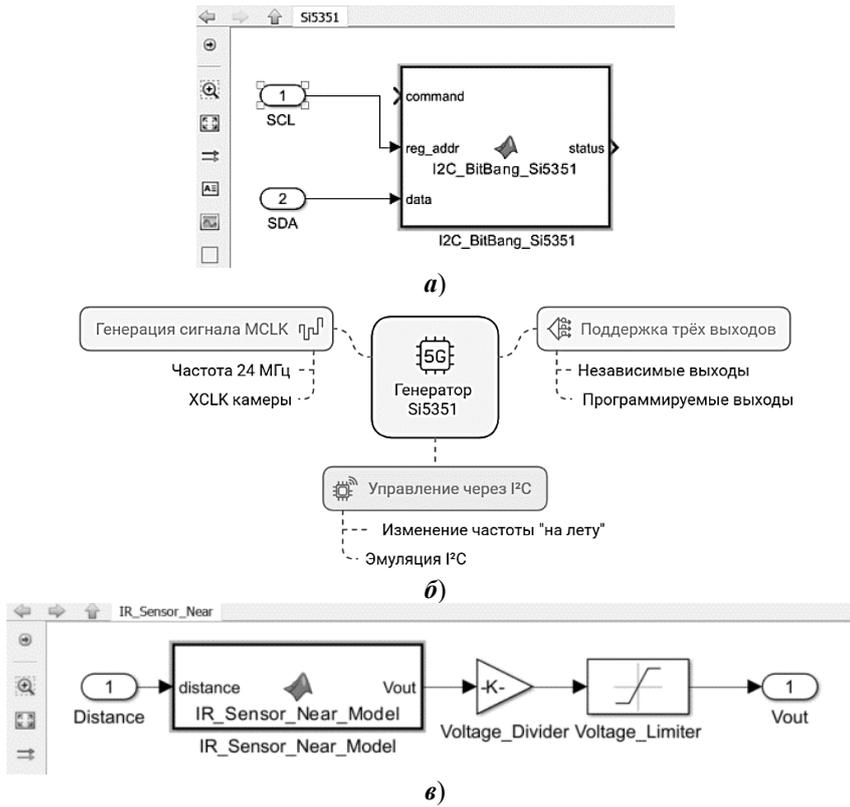


Рис. 6. Модель (а) и блок-схема возможностей и подключения (б) генератора тактового сигнала Si5351; инфракрасный датчик расстояния SHARP (в)

Таблица 1

Таблица подключений

Компонент	Пины МК / Подключение	Примечание
1	2	3
ИК-датчик ближний	Выход 5В → Делитель (R1=4.7кΩ+R2=10кΩ) → PE3 (AIN0)	Делитель снижает с 5 В до ~3,3 В для АЦП МК
ИК-датчик дальний	Выход 5В → Делитель (R1=4.7кΩ+R2=10кΩ) → PE2 (AIN1)	Аналогично для дальнего ИК датчика
Потенциометр	PE5 (AIN8)	Прямое подключение (0–3,3В макс)
Вольтметр	PE0 (AIN3)	Прямое подключение (0–3,3В макс)
DFPlayer Mini	TX(5В) → Делитель(4.7кΩ+10кΩ) → PB0(U1RX) PB1(U1TX) → RX DFPlayer (прямо) VCC(5В), GND	Защита входа RX МК от 5 В DFPlayer воспринимает 3,3 В без проблем Питание DFPlayer от 5 В
nRF24L01	PA2(SSIOCLK), PA5(SSIO TX), PA4(SSIO RX), PA6(CE), PA7(CSN), PE4(IRQ)	3,3 В логика, без делителей

Окончание табл. 1

1	2	3
Камера OV7670	I2C: PB2(SCL), PB3(SDA), D0-D7 (PC4-PC7, PD0-PD3), PB6(PCLK), PD6(vs), PD7(hs), PE1(PWDN), PB5(RST), 3.3В, MCLK от Si5351	Камера питается 3,3 В
Si5351	PB2(SCL), PB3(SDA), VCC (3.3В), GND	Генерирует 24 МГц для камеры

Экспериментальные исследования и обсуждение

В ходе экспериментов проводились расчеты для установки, представленной на рис. 1,б. Рассмотрим преобразование значений АЦП в напряжение. АЦП с 12-битным разрешением (максимальное значение 4095, опорное напряжение 3,3 В) вычисляет напряжение по формуле

$$V_{ADC} = \frac{ADC_value}{4095} \cdot 3,3 \text{ В}. \quad (4)$$

Автоматизированная функция в коде преобразует цифровые значения АЦП обратно в аналоговые.

Для подключения ИК-датчиков и DFPlayer Mini к микроконтроллеру (3,3 В) используются делители напряжения на резисторах 4,7 кОм и 10 кОм:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Также применяется FIR-фильтр для сглаживания шума в измерениях:

$$y[n] = \sum_{i=0}^{N-1} h[i] \cdot x[n-i], \quad (6)$$

где N – число коэффициентов фильтра; $h[i]$ – коэффициенты фильтра; $x[n]$ – входные отсчеты сигнала; $y[n]$ – выходные отсчеты.

Расстояние до препятствия рассчитывается на основе напряжений ИК-датчиков по эмпирическим формулам:

– для ближнего ИК датчика:

$$D_{short} = 12,08 \cdot V^{-1,058}; \quad (7)$$

– для дальнего ИК датчика:

$$D_{long} = 27,86 \cdot V^{-1,15}, \quad (8)$$

где V – напряжение, измеренное и скорректированное с учетом делителя напряжения.

Чувствительность масштабируется потенциометром:

$$Sensitivity = \frac{V_{pot}}{3,3}. \quad (9)$$

Определение уровней препятствий осуществляется по заданным порогам: менее 30sensitivity см – уровень 4, более 120sensitivity см – уровень 0.

Генерация частоты с помощью Si5351 выполняется по формуле

$$F_{out} = \frac{F_{VCO}}{divider}, \quad (10)$$

обеспечивая стабильную работу камеры OV7670.

Получаем divider = 37,5 для выхода 24 МГц при FVCO = 900 МГц.

Для анализа изображений применяется бинаризация пикселей:

$$binImage[i] = \begin{cases} 0, [i] < T, \\ 1, image[i] \geq T, \end{cases} \quad (11)$$

где T – порог 50; вычисляется доля темных пикселей для обнаружения препятствий:

$$darkPixelFraction = \frac{count_of_dark_pixels}{totalPixels}, \quad (12)$$

что упрощает анализ изображения для определения наличия препятствий путем выделения темных областей, которые могут указывать на объекты.

Рассчитаем долю темных пикселей после бинаризации пикселей в 0 (темный) или 1 (светлый) (12).

Формула (12) рассчитывает долю темных пикселей в бинаризованном изображении. Если: $darkPixelFraction > 0,3$, то препятствие обнаружено.

ИК-датчики GP2Y0A21YK0F и GP2Y0A02YK0F обладают узким полем зрения (10° и 6° соответственно). Поле зрения камеры OV7670 определяется параметрами объектива и сенсора и вычисляется по формулам:

$$FoV_h = 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{W/2}{f}\right) = 2 \cdot \operatorname{arctg}(0,4286); \quad (13)$$

$$FoV_v = 2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{H/2}{f}\right) = 2 \cdot \operatorname{arctg}(0,3214), \quad (14)$$

составляя примерно 46° по горизонтали и 36° по вертикали.

Итого поле зрения камеры составляет примерно:

– горизонтальное $FoV = 2 \cdot 23,2 = 46^\circ$.

– вертикальное $FoV = 2 \cdot 17,8 = 36^\circ$.

На основе приведенных выше расчетов была измерена зависимость напряжения от расстояния до препятствия (табл. 2). Для 10–80 см использовался короткий ИК-датчик (V_{short}). Для 20–150 см использовался дальний ИК-датчик (V_{long}).

В табл. 2 приведены напряжения, снимаемые с ИК-датчиков при разных расстояниях. Камера, в отличие от ИК-датчиков, не выдает напряжения напрямую – она генерирует изображение, по которому алгоритм может судить о наличии препятствия, основываясь на доле темных пикселей. В результате камера служит дополнительным источником информации, подтверждающим или опровергающим данные ИК-сенсоров.

Для дистанций 20–80 см короткодействующий ИК-датчик (10–80 см) является оптимальным выбором, так как он работает в своем основном диапазоне, обеспечивая стабильные и точные измерения, особенно в интервале

20–40 см. Дальнедействующий датчик (20–150 см) на этих расстояниях находится на нижней границе возможностей, что снижает его точность и стабильность. Использование короткодействующего датчика упростит техническую реализацию и повысит надежность измерений без необходимости сложной обработки сигнала.

Таблица 2
Зависимость напряжения системы от расстояния до препятствия

D , см	$V_{short}(D)$, В	$V_{long}(D)$, В
10	1,20	–
15	0,82	–
20	0,62	1,33
25	0,50	1,10
30	0,42	0,94
35	0,37	0,82
40	0,32	0,73
45	0,29	0,66
50	0,26	0,60
55	0,24	0,55
60	0,22	0,51
65	0,20	0,48
70	0,19	0,45
80	0,17	0,42
85	–	0,38
90	–	0,36
95	–	0,34
100	–	0,33
105	–	0,31
110	–	0,30
115	–	0,29
120	–	0,28
125	–	0,27
130	–	0,26
135	–	0,25
140	–	0,25
145	–	0,24
150	–	0,23

Заключение

Таким образом, была разработана многофункциональная оптико-электронная система на базе микроконтроллера Tiva C Series с интеграцией сенсоров и модулей, что позволило добиться высокой точности измерений благодаря адаптивным алгоритмам обработки сигналов, снижению шумов и автоматической калибровке в реальном времени. Моделирование в MATLAB/Simulink выявило критические параметры и оптимизировало конструкцию, а испытания подтвердили стабильность работы и адаптивность к изменениям среды. Научная новизна работы заключается в интеграции интеллектуальных алгоритмов с механизмами автоматической адаптации, что повышает точность измерений на 20–30 % по сравнению с аналогами. В данной статье

впервые предложен метод динамической калибровки инфракрасных датчиков, минимизирующий температурные и оптические дрейфы, что расширяет применение системы в промышленных и медицинских задачах.

Список литературы

1. Li S., Li H., Li T., Song X., Wu Y. Reconstructing visible-near-infrared hyperspectral images via liquid crystal based optoelectronic hybrid neural network // *Optics & Laser Technology*. 2025. Vol. 184. doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112521
2. Yang X., Yang W., Wang W., Li K., Li Y., Zhang Q., Wang H., Hou C. A single-chip optoelectronic sensor integrated with the human body for tactile perception and memory // *Device*. 2024. Vol. 2, iss. 11. doi: 10.1016/j.device.2024.100600
3. Badawi N., Batoor K. M. Recent advances incorporating conductive cotton for applications in Sensors, Optoelectronics, and energy Harvesting: A review // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. Vol. 173. doi: 10.1016/j.inoche.2024.113876
4. Meng L., Xu Q., Zhang J., Wang X. Colloidal quantum dot materials for next-generation near-infrared optoelectronics // *Chemical Communications*. 2024. Vol. 60, iss. 9. P. 1072–1088. doi: 10.1039/d3cc04315k
5. Wang D., Cui T., Li Z., Liu H., Yang Y., Ren T. Optoelectronic applications of surface acoustic waves in visible and infrared wavelengths // *Next Nanotechnology*. 2023. Vol. 1. doi: 10.1016/j.nxnano.2023.100004
6. Song Q., Wang Y., Bai K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter // *Infrared Physics & Technology*. 2016. Vol. 77. P. 464–473. doi: 10.1016/j.infrared.2016.06.023
7. Economopoulos T. L., Asvestas P. A., Matsopoulos G. K. Contrast enhancement of images using Partitioned Iterated Function Systems // *Image and Vision Computing*. 2010. Vol. 28, iss. 1. P. 45–54. doi: 10.1016/j.imavis.2009.04.011
8. Deev O. I., Debelov V. V., Endachev D. V., Zuev S. M., Shmatkov Yu. M., Shirokov P. S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and Spectrum of the Light // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 666. P. 032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075

References

1. Li S., Li H., Li T., Song X., Wu Y. Reconstructing visible-near-infrared hyperspectral images via liquid crystal based optoelectronic hybrid neural network. *Optics & Laser Technology*. 2025;184. doi: 10.1016/j.optlastec.2025.112521
2. Yang X., Yang W., Wang W., Li K., Li Y., Zhang Q., Wang H., Hou C. A single-chip optoelectronic sensor integrated with the human body for tactile perception and memory. *Device*. 2024;2(11). doi: 10.1016/j.device.2024.100600
3. Badawi N., Batoor K.M. Recent advances incorporating conductive cotton for applications in Sensors, Optoelectronics, and energy Harvesting: A review. *Inorganic Chemistry Communications*. 2025;173. doi: 10.1016/j.inoche.2024.113876
4. Meng L., Xu Q., Zhang J., Wang X. Colloidal quantum dot materials for next-generation near-infrared optoelectronics. *Chemical Communications*. 2024;60(9):1072–1088. doi: 10.1039/d3cc04315k
5. Wang D., Cui T., Li Z., Liu H., Yang Y., Ren T. Optoelectronic applications of surface acoustic waves in visible and infrared wavelengths. *Next Nanotechnology*. 2023;1. doi: 10.1016/j.nxnano.2023.100004
6. Song Q., Wang Y., Bai K. High dynamic range infrared images detail enhancement based on local edge preserving filter. *Infrared Physics & Technology*. 2016;77:464–473. doi: 10.1016/j.infrared.2016.06.023

7. Economopoulos T.L., Asvestas P.A., Matsopoulos G.K. Contrast enhancement of images using Partitioned Iterated Function Systems. *Image and Vision Computing*. 2010;28(1):45–54. doi: 10.1016/j.imavis.2009.04.011
8. Deev O.I., Debelov V.V., Endachev D.V., Zuev S.M., Shmatkov Yu.M., Shirokov P.S. Technological Vision Systems Using Principle of Analysis of Changing Geometry and Spectrum of the Light. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666:032075. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032075

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Михайлович Зув

кандидат физико-математических, доцент, доцент кафедры оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78); начальник управления подготовки кадров высшей квалификации и ДПО, Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (Россия, г. Москва, ул. Автомоторная, 2)

E-mail: sergei_zuev@mail.ru

Иван Юрьевич Константинов

студент, МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, г. Москва, пр-кт Вернадского, 78)

E-mail: indavanes@yandex.ru

Sergei M. Zuev

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of optical-electronic devices and systems, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia); head of the department for training of highly qualified personnel and additional professional education, The Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute “NAMИ” (2 Avtomotornaya street, Moscow, Russia)

Ivan Yu. Konstantinov

Student, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo avenue, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 14.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025

УДК 681.2-5

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Прогнозирование уровня дефектов производства печатных плат на базе их расчетной надежности

А. А. Трошин¹, И. В. Балахонова²

¹АО «ПО «Электроприбор», Пенза, Россия

²Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mail@electropribor-penza.ru, ²i.v.balachonova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повышение надежности печатных плат связано со снижением уровня их дефектов в процессе производства. Задача прогнозирования уровня дефектов особенно актуальна в ситуации, когда предприятие входит в так называемую точку перегиба, где существующий технологический уровень дает сбой в обеспечении приемлемых показателей дефектов для нарастающего объема производства продукции новой сложности (например, при смене специализации контрактного производства печатных плат с 5 класса точности на 6 класс точности и выше). Заблаговременное определение уровня будущих дефектов позволяет разрабатывать и внедрять мероприятия по снижению издержек производства. Цель исследования – разработать систему уравнений для прогнозирования дефектов производства печатных плат. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи используются метод математического моделирования и методы теории надежности. *Результаты.* Разработана система уравнений для расчета уровня дефектов производства печатных плат, а также спрогнозировано критичное значение данного производства многослойной печатной платы. *Выводы.* Проведена апробация формулы расчета. Результаты апробации демонстрируются на примере сложной многослойной печатной платы класса точности 5+ и многослойной печатной платы 5-го класса точности. Сделан вывод о возможности проведения расширенной апробации на предприятии – изготовителе печатных плат.

Ключевые слова: печатная плата, надежность производства печатной платы, технологический уровень производства, прогнозирование уровня дефектов печатных плат

Для цитирования: Трошин А. А., Балахонова И. В. Прогнозирование уровня дефектов производства печатных плат на базе их расчетной надежности // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 77–88. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Predicting the level of nonconformities (defects) in printed circuit board production based on their calculated reliability

A.A. Troshin¹, I.V. Balakhonova²

¹JSC “PO “Elektropribor”, Penza, Russia

²Penza State University, Penza, Russia

¹mail@electropribor-penza.ru, ²i.v.balachonova@mail.ru

Abstract. *Background.* Improving the reliability of printed circuit boards is associated with reducing the level of their defects in the production process. The task of forecasting the level of defects is especially relevant in a situation where an enterprise enters the so-called inflection point, where the existing technological level fails to ensure acceptable indicators

of defects for the increasing volume of production of products of new complexity (for example, when changing the specialization of contract production of printed circuit boards from accuracy class 5 to accuracy class 6 and higher). Early determination of the level of future defects allows developing and implementing measures to reduce production costs. The purpose of the study is to develop a formula for forecasting defects in the production of printed circuit boards. *Materials and methods.* The following are used to solve the problem: the method of mathematical modeling, methods of reliability theory. *Results.* A formula for calculating the level of defects in the production of printed circuit boards has been developed, and the critical value of this level has been predicted for the "point" implementation of an enhanced quality control procedure within a specific printed circuit board. *Conclusions.* The calculation formula has been tested. The results of the test are demonstrated using a specific multilayer printed circuit board as an example. It is planned to conduct an extended test at a printed circuit board manufacturer.

Keywords: printed circuit board, reliability of printed circuit board production, technological level of production, forecasting the level of defects of printed circuit boards

For citation: Troshin A.A., Balakhonova I.V. Predicting the level of nonconformities (defects) in printed circuit board production based on their calculated reliability. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):77–88. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-7

Введение

Технологической основой развития электроники является закон Мура [1], согласно которому удвоение количества транзисторов на интегральной схеме каждые два года приводит к удешевлению микросхем. Отклонение от тенденции снижения цен на электронику по закону Мура происходит из-за увеличения стоимости производства [2]. В отношении печатных плат данное отклонение от закона Мура авторы данной статьи формулируют следующим образом: стоимость производства печатных плат экспоненциально возрастает с их усложнением при прохождении так называемой «точки перегиба» (рис. 1).

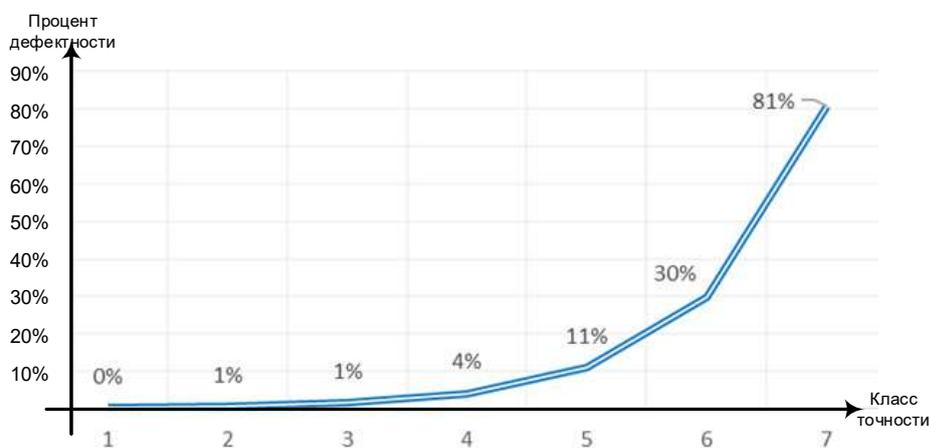


Рис. 1. Пример «точки перегиба» в зависимости от уровня дефектов при повышении сложности многослойных печатных плат

Каждое контрактное производство печатных плат обладает определенным уровнем технологий. Уровень технологии производства печатной платы

соотносится с уровнем сложности данной печатной платы, где данное соотношение определяет «точку перегиба» [3], по прохождению которой происходит значительный рост себестоимости производства печатной платы. Так, например, если предприятию необходимо переходить с производства печатных плат 4–5 класса точности на 6 и 7, то необходимо сделать акцент на переоснащении, а не на увеличении производственных мощностей. Ситуация, когда предприятие изготавливает печатные платы, на которых оно не специализируется, определяет высокий уровень дефектности данных печатных плат. Следствие из закона Мура по «специализации и зачистке потенциальных дефектов» объясняет увеличение себестоимости производства печатных плат в подобной ситуации. Для предприятий встает вопрос заблаговременного выявления «проблемных» печатных плат для точечного запуска процедуры «зачистки потенциальных дефектов» по этим печатным платам.

Определение расчетной надежности технологического процесса производства печатной платы

Надежность печатной платы определяется через прогнозирование интенсивности ее отказов. Авторы, связывая кривую интенсивности отказов печатной платы с ее жизненным циклом, выделяют период от t_0 до t_1 , для которого определяют формулу надежности производства печатной платы $P_{пр}$.

Уровень явных и скрытых дефектов напрямую связан с частотой отказов печатных плат на их жизненном цикле, т.е. за период от t_0 до t_3 (рис. 2). Зависимость частоты отказов от времени $f(t)$ определяется формулой (1) и отображается комбинированной экспоненциальной кривой изменения частоты отказов печатных плат во времени [4]:

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t). \quad (1)$$

Переводя экспоненциальную кривую частоты отказов от времени $f(t)$ в кривую интенсивности отказов от времени $\lambda(t)$, получаем график, представленный на рис. 2, где $\lambda(t) \approx f(t)$.

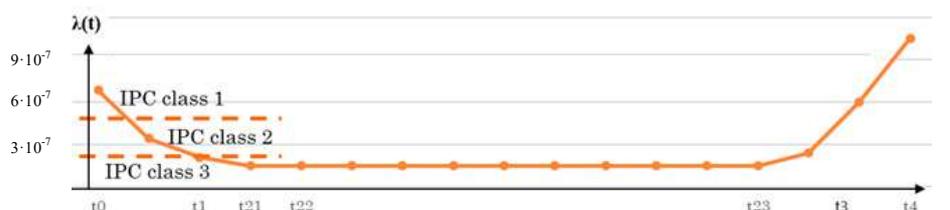


Рис. 2. Кривая интенсивности отказов

Кривую интенсивности отказов авторы охарактеризовали через жизненный цикл печатной платы:

Первый период от t_0 до t_1 : изготовление и испытание работоспособности печатных плат в контрактном производстве. В данный период количество выявленных дефектов (которые могут привести к отказам) высокое. В течение короткого промежутка времени от t_0 до t_1 (рис. 2) частота потенциальных

отказов, связанных с выявлением дефектов, резко уменьшается. Это уменьшение обеспечивается тщательной отбраковкой печатных плат на каждом промежуточном этапе их производства. При этом уровень «зачистки» потенциальных отказов тем выше, чем ниже технологический уровень конкретного производства печатных плат.

Второй период от t_1 до t_{21} : входной контроль печатных плат у заказчика. В данный период заказчик может выявить дополнительные печатные платы с потенциальными дефектами, чтобы минимизировать отказы печатных плат на третьем и четвертом этапах. Момент времени t_1 соответствует началу срока гарантийных обязательств контрактного производства печатных плат.

Третий период от t_{21} до t_{22} : изготовление электронных ячеек на базе печатных плат, монтаж ячеек в изделия, технологическая тренировка изделия у заказчика. Период от t_{21} до t_{22} определяется поверхностным монтажом компонент на печатную плату, сборкой и испытанием изделия, в которое входит печатная плата. В данный период вероятность отказов (следовательно и интенсивность отказов) минимальна, так как частота потенциальных отказов в промежуток времени от t_0 до t_{21} уменьшается экспоненциально. Момент времени t_{22} соответствует началу срока гарантийных обязательств на изделие, в состав которого входит печатная плата. Отказы в этот период обусловлены поверхностным монтажом, когда плата при волновой пайке нагревается до температуры 250 °С. В источниках [4, 5] период с t_1 по t_{22} (рис. 2) называют «приработкой» печатной платы.

Четвертый период от t_{22} до t_{23} : эксплуатация изделия, в состав которого входит печатная плата. В период от t_{22} до t_{23} продолжает действовать гарантия на печатную плату. В данный период надежность печатной платы должна быть максимальной. Момент времени t_{23} соответствует окончанию срока гарантийных обязательств на изделие и на печатную плату, которая входит в изделие. Интервал времени от t_{22} до t_{23} – рабочая область изделий – характеризуется постоянной или незначительно изменяющейся интенсивностью отказов. Отказы в этот период обусловлены неожиданными изменениями условий эксплуатации, например: резкими колебаниями температуры, случайно возникшими вибрациями, ударами и т.п.

Пятый период от t_{23} до t_3 : постгарантийная эксплуатация изделия, в состав которого входит печатная плата. Характеризуется увеличением частоты отказов за счет износа и старения элементов в печатной плате. Физические причины отказов в этот период обусловлены постепенно нарастающими физико-химическими изменениями в печатной плате, например постепенным нарушением защитных покрытий. Отказы, происходящие после времени t_3 , определяют срок службы изделия, в которое входит печатная плата, после которого оно не обеспечивает надежной работы и должно быть заменено.

Шестой период от t_3 до t_4 : вывод из эксплуатации изделия и утилизация печатной платы, входящей в данное изделие.

Как видно из рис. 2, выявляемые дефекты связаны с классом приемки (первым, вторым и третьим), зависящим от требований к надежности изделия, в состав которого входит печатная плата. Максимальное количество дефектов при изготовлении сложных многослойных печатных плат выявляется при втором классе приемки (IPC class 2). Однако, если необходимо повысить надежность печатной платы, то используют усиленную процедуру контроля

качества третьего класса приемки (IPC class 3)¹. В этом случае бракуют также «рабочие» печатные платы, имеющие дефекты, которые в период эксплуатации печатной платы могут спровоцировать отказ изделия.

Интенсивность отказов позволяет судить о надежности печатной платы. Основные факторы, влияющие на расчетную надежность печатной платы (ПП), делятся на три группы [5]: конструкторские, производственные, эксплуатационные, и рассчитывается по формуле

$$P(T) = P_{\text{констр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot P_3(T). \quad (2)$$

Для периода с t_0 по t_1 авторы предлагают принять $P_3(t_0, t_1) = 1$ и руководствоваться формулой

$$P(T) \approx P(t_0, t_1) = P_{\text{констр}} \cdot P_{\text{пр}}; \quad (3)$$

$$P_{\text{пр}} = \begin{cases} \frac{P_M \cdot P_{\text{ТП}}}{C_{\text{кач}}}, & \text{если } \frac{P_{\text{ТП}}}{C_{\text{кач}}} < 1, \\ P_M, & \text{если } \frac{P_{\text{ТП}}}{C_{\text{кач}}} \geq 1, \end{cases} \quad (4)$$

где P_M – надежность базовых материалов и «химии» для мокрых технологических операций в процессе производства печатных плат (основываясь на анализе выявления несоответствий базового материала, предлагается принять $P_M = 0,995$); $P_{\text{ТП}}$ – надежность технологического процесса производства печатных плат определяется уровнем отработки технологического процесса, техническим уровнем оборудования, уровнем кадров; $C_{\text{кач}}$ – коэффициент «зачистки» потенциальных дефектов печатных плат, связанный с использованием процедуры контроля качества [6], рассчитывается по формуле

$$C_{\text{кач}} = 1 + \frac{\ln P(t)}{\beta_{cl}}, \quad (5)$$

где β_{cl} определяет технологический уровень контрактного производства для заданного класса точности печатной платы и класса входного контроля у Заказчика – от низкого уровня (0,03) до высокого уровня (1,0), определение которого базируется на следствии из закона Мура.

Авторы предлагают надежность технологического процесса производства ПП $P_{\text{ТП}}$ рассчитывать по следующей формуле:

$$P_{\text{ТП}} = \frac{P(T) \cdot C_{\text{кач}}}{P_M \cdot P_{\text{констр}}}. \quad (6)$$

Для печатных плат, которые отработаны и запускаются в производство не первый раз (для которых конструкторские недоработки уже устранены),

¹ IPC-A-600G. Acceptability of Printed Boards. Association Connecting Electronics Industries, 2004. 140 p.; IPC-6012D. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. Association Connecting Electronics Industries, 2015. 52 p.

авторы предлагают принять $P_{\text{констр}} = 1,0$. Таким образом, авторы упрощают формулу (6) и получают следующую формулу:

$$P_{\text{ТП}} = \frac{P(T) \cdot C_{\text{кач}}}{0,995 \cdot 1,0}. \quad (7)$$

Авторы статьи ранее рассматривали прогнозирование уровня отказов и надежности печатных плат в зависимости от конструкторских параметров [7], что предлагается использовать при определении надежности технологического процесса $P_{\text{ТП}}$. Вопросы технологического уровня производства печатных плат авторы более подробно рассмотрят в отдельной статье.

Прогнозирование уровня дефектов печатных плат на этапе производства

Перейдем от прогнозирования надежности технологического процесса производства печатной платы к прогнозированию уровня дефектов $Q_{\text{ТП}}$ процесса изготовления печатной платы. Прогнозируемый уровень дефектов $Q_{\text{ТП}}$ печатной платы является критерием оценки как технологического процесса производства, так и контроля, и испытания печатной платы. Требования к контролю печатных плат строятся на основе отечественных стандартов¹ и международного стандарта серии IPC.

Авторы предлагают уровень дефектов производства печатной платы рассчитывать по формуле

$$Q_{\text{ТП}} = 1 - P_{\text{ТП}}. \quad (8)$$

Если расчетный процент потенциальных дефектов печатной платы $Q_{\text{ТП}}$ лежит в диапазоне от 0 до 3,0 %, то контрактное производство печатных плат может осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями IPC class 1 («простая продукция»).

Если $Q_{\text{ТП}}$ лежит в диапазоне от 3,1 до 10,0 %, то контрактное производство должно осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями не ниже IPC class 2 («коммерческая продукция средней сложности»).

Если $Q_{\text{ТП}}$ лежит в диапазоне от 10,1 % и выше (например, при $Q_{\text{ТП}} = 25,5\%$), то контрактное производство должно осуществлять технологический контроль процесса производства печатных плат в соответствии с требованиями IPC class 3 («сложная продукция, требующая повышенной надежности»).

Для приемки IPC class 2 и class 3 понятие «технологического отхода», помимо «остатков» сырья (например, остатков стеклотекстолита), включает дефектные платы по «зачистке» в том числе скрытых дефектов.

¹ ГОСТ Р 55490–2013. Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке, ГОСТ Р 55693–2013. Платы печатные. Технические требования, ГОСТ Р 55744–2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров, ГОСТ Р 56251–2014. Платы печатные. Классификация дефектов.

Реальная надежность производства $P_{\text{фгп}}(t_1, t_{21})$ и фактический процент брака $Q_{\text{фгп}}$ рассчитывается по следующим формулам:

$$P_{\text{фгп}}(t_1, t_{21}) = n(t_1, t_{21}) / N(T), \quad (9)$$

где $n(t_1, t_{21})$ – число годных ПП, признанных заказчиком за отрезок времени от t_1 до t_{21} :

$$n(t_1, t_{21}) = \sum_{i=1}^k n_i, \quad (10)$$

$N(T)$ – число запущенных в производство ПП:

$$N(T) = [N_1(T) + \dots + N_i(T)], \quad (11)$$

$N_1(T)$ – число запущенных ПП в 1-й партии; $N_i(T)$ – число запущенных ПП в i -й партии;

$$Q_{\text{фгп}} = 1 - P_{\text{фгп}}(t_1, t_{21}). \quad (12)$$

Апробация системы уравнений расчета уровня дефектов производства печатных плат

Авторы для апробации системы уравнений расчета уровня дефектов производства печатных плат спрогнозировали технологический уровень контрактного производства β_{cl} печатных плат (табл. 1) для выбранного производства. Так, например, для двухслойных печатных плат 2–3-го класса точности $C_{\text{кач}} = 0,97$, т.е. в среднем бракуется не более 3 % плат от общего количества запущенных в производство простых печатных плат. Скрытые дефекты в готовой продукции отсутствуют. Для двухслойных и многослойных печатных плат 4–5-го класса точности с усилением контроля качества (оптический контроль, электропрозвонка, рентгеновский контроль [8]) $C_{\text{кач}} = 0,90$, когда выявляется не более 10 % дефектных плат от общего количества запущенных в производство. При этом возможны скрытые дефекты в готовой продукции, но не более 0,1 %. Данные дефекты выявляются при входном контроле у Заказчика и/или при поверхностном монтаже компонент на печатную плату. Для сложных плат класса точности от 5+ до 7, а также для плат 4–5-го класса точности с повышенными требованиями к надежности, когда скрытые дефекты не должны превышать 0,001 %, $C_{\text{кач}} = 0,75$, т.е. более 25 % плат (от общего количества запущенных в производство) определяются как имеющие дефекты. В этом случае процедура контроля усиливается контролем внутреннего состояния многослойной печатной платы (например, по микрошлифтам, контролю импеданса).

В качестве входных данных приведем двадцать характеристик двух печатных плат (табл. 2), данные рис. 3 и 4, а также технологический уровень производства. Спрогнозируем потенциальную интенсивность отказов при эксплуатации платы в изделии (итоги табл. 2).

Таблица 1

Определение условно постоянного параметра β_{cl}
для конкретного контрактного производства печатных плат

Класс точности ПП	4	5	5+	6	7
Показатель технологического уровня контрактного производства печатных плат (β_{cl})	от 1 до 0,4	от 0,5 до 0,2	от 0,3 до 0,1	от 0,2 до 0,05	от 0,1 до 0,03

Таблица 2

Параметры печатных плат №1 и №2

Описание параметра	ЕИ	Значение платы № 1	Значение платы № 2
1. Эксплуатация ПП: аппаратура, используемая в режиме стационарного применения в помещениях		1	1
2. Число слоев в ПП	шт.	6	8
3. Количество сквозных металлизированных отверстий, пропаянных волной	шт.	2145	1018
4. Количество сквозных металлизированных отверстий, пропаянных ручной пайкой	шт.	96	6
5. Количество монтажных и служебных отверстий	шт.	106	14
6. Табличная температура окружающей среды при эксплуатации	°С	30	30
7. Температура вблизи печатной платы по наиболее теплонагруженному элементу на ПП	°С	70	60
8. Площадь платы	см ²	528,138	147,84
9. Толщина ПП	Мм	1,6	1,5
10. Преимущественная ширина печатного проводника	Мм	0,1	0,1
11. Минимальный диаметр сквозных неметаллизированных отверстий	Мм	0,2	0,3
12. Количество слоев жидкой защитной маски	шт.	2	2
13. Слои шелкографии	шт.	2	2
14. Площадь иммерсионного золочения	дм ²	7,4	0,0
15. Площадь финишного покрытия олово-свинец	дм ²	0,0	2,1
16. Класс точности печатной платы		5+	5
17. Количество соединений для элементов печатной платы, пропаянных «пайка волной»	шт.	1072	509
18. Количество соединений для элементов печатной платы, пропаянных ручным способом	шт.	48	5
19. Класс IPC использования и приемки у Заказчика		3	2
20. Гарантийный срок службы ПП в изделии ΔT	ч	26280	26280
I. Расчетный уровень отказов λ'',	1/ч	$9,17 \cdot 10^{-7}$	$3,42 \cdot 10^{-7}$
II. Расчетная надежность работы платы $P(T)$	%	97,62	99,1
III. Расчетная вероятность отказов платы $Q(T)$	%	2,38	0,9
IV. Расчетная вероятность выявления дефектов в процессе производства ПП при текущем техническом уровне $Q_{тп}$	%	25,5	3,4

сл 1/0	МЕДНАЯ ФОЛЬГА НТЕ JINBAO, 18 МКМ, ШИРИНА РУЛОНА 650 ММ	0,018
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 2/3	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,300-35-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,37
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 4/5	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,300-35-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,37
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 6/0	МЕДНАЯ ФОЛЬГА НТЕ JINBAO, 18 МКМ, ШИРИНА РУЛОНА 650 ММ	0,018

Рис. 3. Раскладка слоев для платы № 1

сл 1/0	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,100-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,136
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 2/3	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 4/5	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 6/7	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,200-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,236
	Препрег 2116-ЭМ-5 РАЗМЕР 1.260 М (РУЛОН)	0,133
сл 8/0	СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ ФОЛЬГИРОВАННЫЙ СТФ-Д-0,100-18-ЭМ-5 (1220x1020 ММ)	0,136

Рис. 4. Раскладка слоев для платы № 2

Используя формулы из предыдущей статьи авторов [7], рассчитаем расчетную вероятность отказа печатной платы $Q(T)$ и расчетную надежность печатной платы $P(T)$, занесем эти результаты в табл. 2. Для многослойной печатной платы № 1 $Q(T) = 2,38 \%$, $P(T) = 97,62$. Для многослойной печатной платы № 2 $Q(T) = 0,9 \%$, $P(T) = 99,1$.

Расчетная надежность печатной платы зависит только от конструкторских параметров. Тогда как количество выявленных дефектов зависит также и от технического уровня конкретного контрактного производства печатных плат. В табл. 3 приведен расчет надежности для сложной многослойной печатной платы № 1 по факту:

$$P_{\text{фТП}}(t_1, t_{21}) = 0,726 \text{ или } 72,6 \%; \quad Q_{\text{фТП}} = 1 - 0,726 = 0,274 \text{ или } 27,4 \% .$$

Расчетный процент дефектов $Q_{\text{ТП}}$ составил 25,5 % (который занесли в табл. 2). Данное значение релевантно фактическому, но более чем в 2 раза превышает нормативное, что свидетельствует о необходимости «точечного

подхода», разработки и внедрения мероприятий по данной печатной плате в рамках действия периода точки перегиба. Данный вывод подтверждается результатом анализа характеристик печатной платы, когда фиксируется увеличение сложности платы № 1 (по сравнению с характеристиками платы 5-го класса точности) – одна из характеристик платы соответствует требованиям 6-го класса точности.

Таблица 3

Итоги производства печатной платы № 1

Результаты производства и контроля качества печатных плат	Кол. ПП	Надежность по итогам входного контроля Заказчика
1. Заявка клиента на производство ПП	192	
2. Запуск с учетом технологический отхода и кратности заготовки	212	
3. Отбраковка ПП как технологический отход $n_1(t_0, t_1)$	20	
4. Отбраковка ПП как брак $n_2(t_0, t_1)$	10	
5. Отгрузка ПП клиенту как годный продукт	182	
6. Осталось в незавершенном производстве	0	
7. Получение Клиентом ПП и входной контроль $N_1(T)$	182	
8. Возврат ПП в контрактное производство по рекламации	28	
9. Годные по результатам входного контроля ПП $n_1(T)$	154	0,726
10. Компенсация ПП (по браку и рекламации), дозапуск ПП	38	

Таблица 4

Итоги производства печатной платы № 2

Результаты производства и контроля качества печатных плат	Кол. ПП	Надежность по итогам входного контроля Заказчика
1. Заявка клиента на производство ПП	910	
2. Запуск с учетом технологический отхода и кратности заготовки	1008	
3. Отбраковка ПП как технологический отход $n_1(t_0, t_1)$	42	
4. Отгрузка ПП клиенту как годный продукт	910	0,903
5. Осталось в незавершенном производстве	56	0,958
6. Получение Клиентом ПП и входной контроль $N_1(T)$	910	
7. Возврат ПП в контрактное производство по рекламации	0	
8. Годные по результатам входного контроля ПП $n_1(T)$	910	1

В отсутствие прогнозирования уровня дефектов контрактному производству приходится 3 и более раз запускать в производство партии сложных

многослойных печатных плат, что растягивает срок исполнения заказа более чем в 3 раза и ведет к существенному росту расходов.

В табл. 4 приведен расчет надежности для многослойной печатной платы № 2.

Без учета незавершенного производства $Q_{фТП} = 1 - 0,903 = 0,097$, или 9,7 %. С учетом незавершенного производства $Q_{фТП} = 1 - 0,958 = 0,042$, или 4,2 %. Расчетный процент дефектов $Q_{ТП}$ составил 3,4 % (который отражен в табл. 2). Характеристики печатной платы определяют ее отнесение к 5-му классу точности, объемы производства которого ранее доминировали в анализируемом контрактном производстве, что подтверждает отсутствие точки перегиба для плат подобной сложности. Также отметим, что расчетный уровень дефектов по данной печатной плате не противоречит фактическому проценту дефектов и находится в пределах нормативного технологического отхода.

Заключение

При переходе на производство более сложных печатных плат их себестоимость возрастает из-за зачистки потенциальных дефектов. Для рассмотренного в статье контрактного производства «точка перегиба» связана с производством многослойных печатных плат 5+ и 6-го класса точности. Переходя «точку перегиба» при наращивании объема производства печатных плат 5+ и 6-го класса точности с одновременным доминированием технологического уровня для 5-го и 4-го класса точности печатных плат, в контрактном производстве увеличиваются дефекты. Авторы разработали систему уравнений для расчета уровня дефектов, использование которой позволит производителю печатных плат заблаговременно оценить «точку перегиба» и внедрить «точечные» мероприятия по снижению потерь в разрезе конкретных печатных плат.

Список литературы

1. Вернер В., Кузнецов Е., Сауров А. Закону Мура 50 лет: завершение или изменение? // Наноиндустрия. 2015. № 6 (60). С. 50–62.
2. Dorsch J. The End of Scaling? URL: <http://electroiq.com/mysemicondaily/2014/07/09/>
3. Martin B. Are We At an Inflection Point with Silicon Scaling and Homogeneous ICs? URL: <http://semimd.com/blog/2014/10/15/>
4. Астахов В. П. Основы надежности электронно-оптических приборов. М. : МГУПИ, 2007. 62 с.
5. Гормаков А. Н., Воронина Н. А. Конструирование и технология электронных устройств приборов. Печатные платы : учеб. пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2006. 164 с.
6. Чиминев А. Печатные платы – ключевой компонент, определяющий надежность конечного продукта // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 6. С. 42–46.
7. Трошин А. А., Балахонова И. В. Совершенствование математической модели прогнозирования отказов печатных плат // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 19–29.
8. Шнейдмиллер В. Р. Дефекты и анализ печатных плат // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всерос. науч.-техн. конф.

(г. Самара, 15–17 мая 2018 г.) / под ред. А. И. Данилина. Самара : Офорт, 2018. С. 176–177.

References

1. Verner V., Kuznetsov E., Saurov A. Moore's law at 50: end or change? *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2015;(6):50–62. (In Russ.)
2. Dorsch J. *The End of Scaling?* Available at: <http://electroi.com/mysemicondaily/2014/07/09/>
3. Martin B. *Are We At an Inflection Point with Silicon Scaling and Homogeneous ICs?* Available at: <http://semimd.com/blog/2014/10/15/>
4. Astakhov V.P. *Osnovy nadezhnosti elektronno-opticheskikh priborov = Fundamentals of reliability of electronic-optical devices*. Moscow: MGUPI, 2007:62. (In Russ.)
5. Gormakov A.N., Voronina N.A. *Konstruirovaniye i tekhnologiya elektronnykh ustroystv priborov. Pechatnye platy: ucheb. posobie = Design and technology of electronic devices and instruments. Printed circuit boards: textbook*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2006:164. (In Russ.)
6. Chiminev A. Printed circuit boards are a key component that determines the reliability of the final product. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes = Electronics: science, technology, business*. 2020;(6):42–46. (In Russ.)
7. Troshin A.A., Balakhonova I.V. Improving the mathematical model for predicting printed circuit board failures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Po-volzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):19–29. (In Russ.)
8. Shneydmiller V.R. Defects and analysis of printed circuit boards. *Aktual'nye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy: materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Samara, 15–17 maya 2018 g.) = Current issues in radio electronics and telecommunications: proceedings of the All-Russian scientific and engineering conference (Samara, May 15–17, 2018)*. Samara: Ofort, 2018:176–177. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Алексеевич Трошин

генеральный директор,
АО «ПО «Электроприбор»
(Россия, г. Пенза, пр-кт Победы, 69)

E-mail: mail@electropribor-penza.ru

Aleksey A. Troshin

General director, JSC “PO “Electropribor”
(69 Pobedy avenue, Penza, Russia)

Ирина Владимировна Балахонова

кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: i.v.balachonova@mail.ru

Irina V. Balakhonova

Candidate of economic sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of instrument
engineering, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 23.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.03.2025

Принята к публикации / Accepted 10.04.2025

УДК 621.317.39.084.2

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Метод измерения угловой скорости воздушного потока

В. В. Седышев

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

sedyshev@usu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Измерение скорости перемещения или вращения подвижных объектов, воздушных и жидкостных сред является одним из самых распространенных в авиационно-космической, автотранспортной и производственной промышленности. С появлением новых принципов, законов и методов определения переменных и параметров физических величин происходит разработка новых приборов и средств измерительной техники. *Материалы и методы.* Предлагается рассмотреть один из методов измерения угловой скорости подвижных объектов на основе динамики воздушного потока, который, в свою очередь, может быть образован вращением маховика любого двигателя, маневра летательного аппарата и др. При наличии воздушного потока и появлении переносной угловой скорости возникает сложное движение, в котором создается сила Кориолиса, приводящая к перераспределению перепада давления жидкости или газа в потоке. Измерение перепада давления позволяет определить угловую скорость вращения данного подвижного объекта. Перепад давления можно измерить с помощью различных чувствительных элементов, например тензодатчиками, ультразвуковыми пластинами и другими средствами измерения физических величин. *Результаты.* Непосредственное измерение перепада давления воздушного потока осуществляется с помощью тонких сопел. Исследование проводилось на базе поворотной установки УПГ-48 и гироскопического мотора в сборе с гиросломом. *Выводы.* Сигнал (перепад давления), пропорциональный угловой скорости, измерялся с помощью сопел, а затем усиливался с помощью струйного усилителя. Исследования показали, что чувствительность измерительного прибора, построенного на предложенном методе, составляет 0,6 Гц.

Ключевые слова: угловая скорость, измерение, сила Кориолиса, гидродинамика, перепад давления, эксперимент

Для цитирования: Седышев В. В. Метод измерения угловой скорости воздушного потока // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 89–97. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Method for measuring the angular velocity of airflow

V.V. Sedyshev

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

sedyshev@usu.ru

Abstract. *Background.* Measuring the speed of movement or rotation of moving objects, as well as air and liquid media, is one of the most common practices in aviation, automotive, and manufacturing industries. With the emergence of new principles, laws, and methods for determining variables and parameters of physical quantities, new devices and measurement techniques are being developed. *Materials and methods.* This work proposes a method for measuring the angular velocity of moving objects based on the dynamics of airflow, which

can be generated by the rotation of a flywheel of any engine, maneuvering of an aircraft, and more. When there is an airflow and a portable angular velocity occurs, a complex motion arises, creating a Coriolis force that leads to the redistribution of pressure differences in the liquid or gas flow. Measuring the pressure difference allows for the determination of the angular velocity of the rotating object. The pressure difference can be measured using various sensitive elements, such as strain gauges, ultrasonic plates, and other means of measuring physical quantities. *Results.* This work involves the direct measurement of the pressure difference in the airflow using thin nozzles. The research was conducted using a rotating installation UPG-48 and a gyroscopic motor assembled with a gyro unit. *Conclusions.* The signal (pressure difference) proportional to the angular velocity was measured using nozzles and then amplified with a jet amplifier. The studies showed that the sensitivity of the measuring device based on the proposed method is 0.6 Hz.

Keywords: angular velocity, measurement, Coriolis force, hydrodynamics, pressure difference, experiment

For citation: Sedyshev V.V. Method for measuring the angular velocity of airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):89–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-8

Введение

Развитию измерительных приборов в авиационной, космической, автомобильной и машиностроительной промышленности в последнее время уделяется много внимания, а особенно импортозамещению средств измерительной техники [1]. Процесс измерения различных физических величин осуществляется с помощью специальных технических средств, которые отличаются друг от друга по своей сложности и принципу действия. В основе каждого измерительного прибора лежат определенные методы и законы определения той или иной физической величины. Использование различных физических явлений, эффектов и свойств, известных ранее, позволяет создать новые методы измерения, которые могут быть использованы для управления техническими или технологическими системами [2, 3].

Развитие измерения скорости и перемещения объекта в последние годы существенно возросло. Это связано с необходимостью с высокой точностью и быстродействием управлять как техническими системами, так и системами управления движением. Перспективные электромеханические, микромеханические и наномеханические приборы измерения в основном опираются на физические величины, которые базируются на новейших достижениях классической механики, электродинамики, физики полупроводников, а также гидро- и газодинамики [4]. В последнее время много внимания уделяется учету возмущающих факторов, влияющих на показания приборов измерения скорости потока, расхода жидкости и газа [5].

Материалы и методы

Методов измерения угловой скорости довольно много. В работе предлагается один из методов измерения угловой скорости подвижного объекта, который прямо пропорционально зависит от перепада давления газа вращающегося потока.

Описание процессов, происходящих в газовом потоке, рассмотрим на примере быстровращающегося маховика. На рис. 1 представлена механиче-

ская система, которая состоит из быстровращающегося маховика 1, расположенного в подшипниковой опоре 2, которая, в свою очередь, связана с кожухом (на рис. 1 не показан), воздушных сопел 3, установленных вдоль образующей ротора и сопел 4, расположенных перпендикулярно оси вращения маховика.

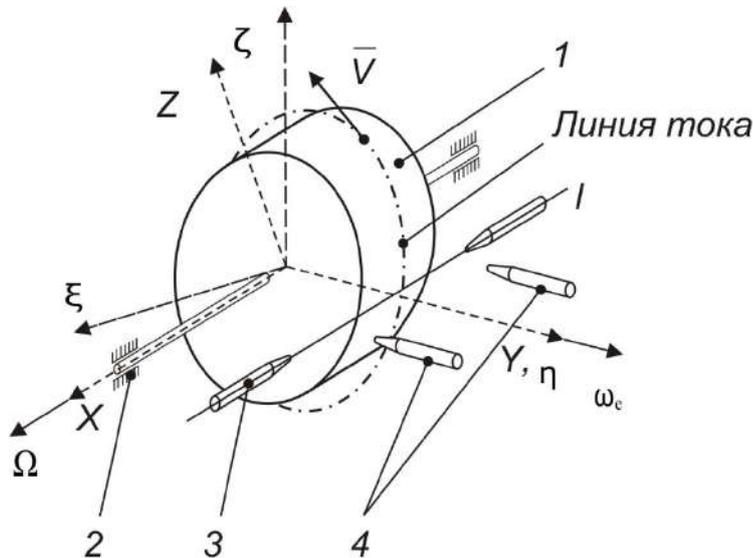


Рис. 1. Вращающийся маховик

С целью описания метода измерения угловой скорости рассмотрим процессы, происходящие в газовом потоке, который образован вокруг вращающегося маховика. Допустим, что маховик вращается с угловой скоростью Ω , при этом окружающий его газ приводится в движение наружной поверхностью маховика. В результате этого образующий газовый поток имеет два пограничных слоя (рис. 2): вблизи вращающегося маховика $q_{\text{ПМ}}$ и вблизи неподвижного кожуха $q_{\text{ПК}}$. Между пограничными слоями скорость газа приблизительно постоянна и равна половине скорости вращения маховика $V = \frac{1}{2} R_{\text{м}} \Omega$ [6–8]. Предположим, что отношение зазора между маховиком и кожухом к диаметру маховика находится в диапазоне 0,01...0,05. В этом случае аэродинамический момент сопротивления и теплоотдачи в пограничных слоях приблизительно постоянны.

Будем считать, что скорость движения газового потока в 2 раза меньше скорости звука. Механика этого потока может быть охарактеризована безразмерным критерием подобия – числом Рейнольдса Re [9]. В рассматриваемом случае она составляет $Re = 0,7 \cdot 10^3 \dots 10^5$. Это означает, что характер течения газа изменяется от ламинарного к турбулентному. Турбулентное движение выглядит макроскопически, как наложение непрерывного движения на движение, характеризуемое турбулентными флуктуациями [6]. В первом приближении газовый поток между пограничными слоями можно охарактеризовать как ламинарный, следовательно, для вывода уравнения измерителя

угловой скорости можно использовать дифференциальное уравнение Эйлера. Это уравнение движения потока газа в форме Громеко – Ламба [6] имеет вид

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \overline{\text{grad}} \left(\frac{V^2}{2} \right) + 2\bar{\omega}x\bar{V} = F - \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad}} P, \quad (1)$$

где \bar{F} – объемная сила в точке линии тока; $\bar{\omega} = \text{rot } \bar{V}$ – вектор угловой скорости (завихренность) частички газа; P – гидродинамическое давление.

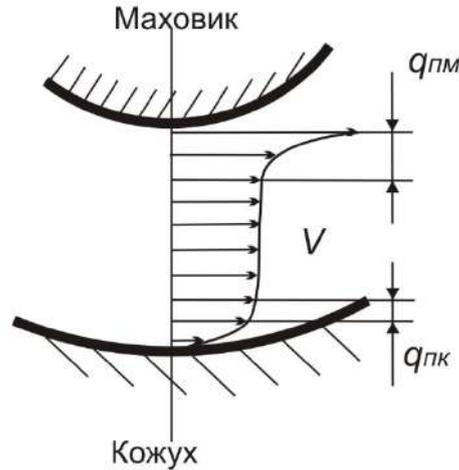


Рис. 2. Распределение скоростей: $q_{пм}$ – толщина пограничного слоя около маховика; $q_{пк}$ – толщина пограничного слоя около кожуха

Для стационарного течения газа с постоянной линейной скоростью V уравнение (1) примет вид

$$\text{grad} \left(\frac{V^2}{2} + \Psi + \Pi \right) = -2\bar{\omega} + \bar{V}, \quad (2)$$

где $\Psi(P)$ – функция давления поверхностных сил; Π – потенциал объемных сил $\bar{F} = -\text{grad}(\Pi)$.

В случае установившегося поля скоростей траектория движения частичек газа становится линией тока (см. рис. 1). Согласно теореме Бернулли [6] сумма кинетической энергии на единицу массы газа, функции давления и приведенного к единице массы потенциала объемных сил $\left(B = \frac{V^2}{2} + \Psi + \Pi \right)$ сохраняет постоянное значение вдоль линии тока. Для стационарного, изотермического и баротропного движения газа имеем

$$\Psi(P) = \frac{P}{\rho} + \text{const}, \quad (3)$$

$$\Pi = gz + \text{const}, \quad (4)$$

где ρ – плотность газа; g – ускорение свободного падения; z – ось, направленная вертикально вверх.

Пусть вращающийся маховик имеет относительную линейную скорость V . Предположим, что система координат XYZ жестко связана с опорами маховика 2 (см. рис. 1), совершает вращательное движение с угловой скоростью $\bar{\omega}_e$ относительно неподвижной системы координат $\zeta\eta\zeta$, тогда частичка газа будет совершать сложное движение. В результате на частичку с единицей массы газа будут действовать дополнительные силы. Это сила инерции Кориолиса

$$\bar{F}_k = -2\bar{\omega}_e + \bar{V}, \quad (5)$$

и центробежная сила

$$\bar{F}_ц = \frac{1}{2} \overline{\text{grad}(\bar{\omega}_e x \bar{r})^2}, \quad (6)$$

где \bar{r} – радиус-вектор точки массы газа.

Центробежная сила $\bar{F}_ц$ войдет в выражение потенциала объемных сил Π , а сила Кориолиса в правую часть уравнения (2). Согласно выражениям (3), (4), (5) и (6) уравнение (2) примет вид

$$\text{grad} \left[\frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz + \frac{1}{2} (\bar{\omega}_e x \bar{r})^2 \right] = -2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e) x \bar{V}. \quad (7)$$

Сумма $2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e)$ в уравнении (7) является локальной завихренностью газа по отношению к подвижной системе координат XYZ . Вектор завихренности $\bar{\omega}$ параллелен угловой скорости вращения маховика $\bar{\Omega}$ и вдоль линии l (см. рис. 1) будет равен нулю. Линейная скорость V и сила веса gz вдоль линии l не изменит своей величины. Градиент от центробежной силы по l обратится в ноль. С учетом этого вдоль линии l уравнения (7) примет вид

$$\frac{d(P/\rho)}{dl} = 2\omega_e V. \quad (8)$$

Сделав разделение переменных и взяв интеграл по линии, образующей маховика l и перепаду давления ΔP , получим

$$\Delta P \approx 2\omega_e VL\rho. \quad (9)$$

Согласно линейной скорости газового потока между пограничными слоями (см. рис. 2) имеем

$$V = \frac{1}{2} R_M \Omega,$$

где R_M – радиус маховика.

В результате перепад давления в выражении (9) примет вид

$$\Delta P \approx R_M L \Omega \rho \omega_e. \quad (10)$$

Если локальная завихренность газа $2(\bar{\omega} + \bar{\omega}_e)$ равна нулю, то величина B будет постоянной согласно теореме Бернулли, так же как и в установившемся движении в неподвижной системе координат $\xi\eta\zeta$, а перепад давления ΔP станет равным нулю.

Результаты

Метод, заложенный в измерении переносной угловой скорости воздушного потока $\bar{\omega}_e$, сводится к получению перепада давления. Перепад давления определяется с помощью ввода дополнительных устройств.

Из выражения (10) видно, что перепад давления ΔP прямо пропорционален угловой скорости возмущения ω_e . Если установить две струйные трубки 3 и 4 (см. рис. 1), то на выходе будем иметь информацию об угловой скорости ω_e , выраженную через давление по формуле (10). Измеритель угловой скорости, построенный на струйных трубках 3, будет более чувствителен к угловой скорости возмущения, чем на струйных трубках – 4, так как он замеряет заторможенный поток газа, течение которого вызвано силой Кориолиса. Для воздушного потока перепад давления имеет небольшую величину (порядка 10 Па). Следовательно, при использовании такого измерителя необходимо применить многокаскадные струйные усилители, которые имеют коэффициент усиления по давлению порядка 10^4 и выше. Изменение давлений многокаскадного струйного усилителя может быть представлено системой уравнений

$$\begin{aligned} P_2 &= P_0 - K_1^* R_M L \Omega \rho \omega_e; \\ P_2' &= P_0 + K_1^* R_M L \Omega \rho \omega_e, \end{aligned} \quad (11)$$

где P_0 – максимальное давление в приемном канале окончательного каскада усиления; P_2 и P_2' – выходные давления многокаскадного усилителя, построенного по дифференциальной схеме; K_1^* – коэффициент усиления струйного усилителя.

Таким образом, изложенный метод может быть использован для построения датчиков угловой скорости движущихся объектов.

Обсуждение

С целью подтверждения предложенного метода измерения угловой скорости $\bar{\omega}_e$ через перепад давления ΔP был осуществлен натурный эксперимент. Для проведения эксперимента создан стенд, в котором использовалась поворотная установка УПГ-48, предназначенная для проверки работы гироскопических приборов навигации. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде (рис. 3,а), состоящем из установки УПГ-48 1, на поворотном столе 2 которого закреплен прибор для измерения угловой скорости, построенный на базе двухстаторного асинхронного негерметического гиروزла ГУА-25000 3 со встроенными соплами 4. Показания перепада давления определялись с помощью водяного манометра 6 через струйный усилитель 5 [10], на который дополнительно подавался сжатый воздух с давлением P_0 согласно уравнениям (11).

Результаты испытаний представлены в виде графика (рис. 3,б). Из графика видно, что наименьшая скорость вращения поворотного стола, при которой осуществляется устойчивое измерение, составляет примерно 3 рад/с, или 0,6 Гц. Дальнейшие эксперименты показали устойчивое измерение, которое проводилось до скорости 1 Гц.

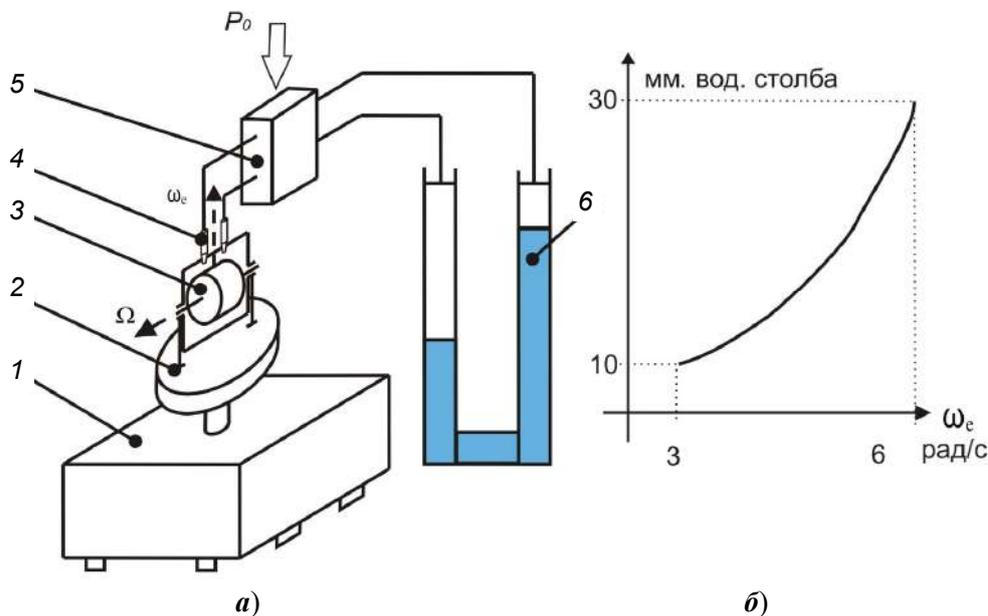


Рис. 3. Экспериментальные исследования:
а – испытательный стенд; б – результаты испытаний

Заключение

Представленный метод измерения угловой скорости $\bar{\omega}_e$ через перепад давления ΔP от газового потока вращающегося маховика имеет место. Результат испытаний на стенде (см. рис. 3,б) показал, что чувствительность такого прибора лежит в диапазоне частот от 0,6 до 1 Гц. Это объясняется физическими свойствами движущегося потока газа. При более высоких скоростях вращения маховика Ω , а следовательно, и потока газа сигнал $\bar{\omega}_e$, выраженный через перепад давления ΔP , более устойчивый и информационный.

Практическая значимость: предложенный метод может быть использован для разработки и создания гироскопических приборов и систем, где использование электрического сигнала невозможно.

Список литературы

1. Михайлиди Д. Х., Рагуткин А. В., Скобелев Д. О., Сухатерин А. Б. Организация инжинирингового центра для импортозамещения в промышленности // Russian Technological Journal. 2023. Vol. 11, № 4. С. 105–115. doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-105-115
2. Yuxiaoa С., Chunjun Ch., Chaоа D. Исследование вибрационного воздействия на пьезорезистивный датчик давления // Приборы и техника эксперимента. 2022. № 4. С. 115–130.

3. Матвеев В. В., Погорелов М. Г., Хомячкова А. Н. Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта // Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15, № 3. С. 195–204.
4. Караян Г. С., Гандилян С. В., Гандилян В. В. Современное состояние и перспективы развития микросистемной электромеханики // Вестник Московского энергетического института. 2017. № 5. С. 63–70. doi: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70
5. Романов В. А., Тараненко П. А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 2. С. 134–144. doi: 10.15593/perm.mech/2020.2.11
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1973. 848 с.
7. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск : Наука, 2008. 96 с.
8. Баутин С. П., Крутова И. Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса : монография. Екатеринбург : УрГУПС, 2019. 181 с.
9. Макаров К. А. О физическом смысле числа Рейнольдса и других критериев гидродинамического подобия // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185>
10. Касимов А. М., Попов А. И. О новой концепции построения струйных устройств управления // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2024 (Москва 17–20 июня 2024). М., 2024. С. 2201–2206.

References

1. Mikhaylidi D.Kh., Ragutkin A.V., Skobelev D.O., Sukhaterin A.B. Organization of an engineering center for import substitution in industry. *Russian Technological Journal*. 2023;11(4):105–115. (In Russ.). doi: 10.32362/2500-316X-2023-11-4-105-115
2. Yuxiaoa C., Chunjun Ch., Chaoa D. Study of vibration effects on piezoresistive pressure sensor. *Pribory i tekhnika eksperimenta = Instruments and experimental technique*. 2022;(4):115–130. (In Russ.)
3. Matveev V.V., Pogorelov M.G., Khomyachkova A.N. Modified TRIAD method for solving the problem of orientation of a moving object. *Pribory i metody izmereniy = Instruments and methods of measurement*. 2024;15(3):195–204. (In Russ.)
4. Karayan G.S., Gandilyan S.V., Gandilyan V.V. Current state and development prospects of microsystem electromechanics. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2017;(5):63–70. (In Russ.). doi: 10.24160/1993-6982-2017-5-63-70
5. Romanov V.A., Taranenko P.A. Evaluation of dissipative properties of the oscillatory system of a serial sample of the Coriolis flow-era. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika = Bulletin of Perm National Research Polytechnic University*. Mechanics. 2020;(2):134–144. (In Russ.). doi: 10.15593/perm.mech/2020.2.11
6. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza = Fluid and gas mechanics*. Moscow: Nauka, 1973:848. (In Russ.)
7. Bautin S.P. *Tornado i sila Koriolisa = Tornado and Coriolis force*. Novosibirsk: Nauka, 2008:96. (In Russ.)
8. Bautin S.P., Krutova I.Yu. *Analiticheskoe i chislennoe modelirovanie techeniy gaza pri uchete deystviya sily Koriolisa: monografiya = Analytical and numerical modeling of gas flows taking into account the effect of the coriolis force: monograph*. Ekaterinburg: UrGUPS, 2019:181. (In Russ.)
9. Makarov K.A. On the physical meaning of the Reynolds number and other criteria of hydrodynamic similarity. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering journal: science and innovation*. 2014;(1). (In Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1185>

10. Kasimov A.M., Popov A.I. On a new concept for constructing jet control devices. *XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2024 (Moskva 17–20 iyunya 2024) = All-Russian Conference on Management Problems 2024 (June 17-20, 2024, Moscow)*. Moscow, 2024:2201–2206. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вячеслав Викторович Седышев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации
и управления, Высшая школа
электроники и компьютерных наук,
Южно-Уральский государственный
университет (национальный
исследовательский университет)
(Россия, г. Челябинск, пр-кт Ленина, 76)

E-mail: sedyshev@susu.ru

Vyacheslav V. Sedyshev

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of automation and control,
Higher School of Electronics and Computer
Science, South Ural State University
(National Research University) (76 Lenina
avenue, Chelyabinsk, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 23.03.2025

Принята к публикации / Accepted 21.04.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 621
doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-9

Соединения с натягом, собираемые осевым способом и экспериментальное определение их герметичности по предложенному техническому решению

Н. Е. Курносов¹, К. В. Лебединский², Ю. Ю. Накашидзе³

^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹kurnosov-ne@mail.ru, ²lebedinskiy_k@mail.ru, ³yyn700@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Среди всех неподвижных соединений в машиностроении соединения с натягом отличаются широким многообразием и составляют около 20 % всех соединений. Проанализированы существующие способы сборки соединений с натягом и указаны решения по обеспечению их герметичности. Целью работы является обеспечение герметичности соединений с натягом при продольном способе сборки. *Материалы и методы.* Приведена программа экспериментальных исследований. Предложено техническое решение. Показано, что управление формобразованием поверхностного слоя сопрягаемых деталей при продольном способе сборки решает задачу обеспечения герметичности соединений. *Результаты.* Представлены графики зависимости усилий запрессовки по длине соединения от величины натяга и наличия герметика, а также степени герметичности запрессованных деталей, собранных из разных материалов. *Выводы.* Соединения с натягом, собранные по существующей технологии без герметика, не обеспечивают герметичность соединения, в то же время использование герметика увеличивает усилие запрессовки. Управление формированием поверхностного слоя охватываемой детали возможно без усложнения конструкции и технологии изготовления, что позволяет обеспечить прочностные характеристики и требуемую герметичность соединений.

Ключевые слова: соединение с натягом, сопрягаемые детали, герметичность, способы сборки, формобразование

Для цитирования: Курносов Н. Е., Лебединский К. В., Накашидзе Ю. Ю. Соединения с натягом, собираемые осевым способом и экспериментальное определение их герметичности по предложенному техническому решению // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 98–109. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-9

Tension joints assembled by axial method and experimental determination of their tightness according to the proposed technical solution

N.E. Kurnosov¹, K.V. Lebedinskiy², Yu.Yu. Nakashidze³

© Курносов Н. Е., Лебединский К. В., Накашидзе Ю. Ю., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹kurnosov-ne@mail.ru, ²lebedinskiy_k@mail.ru, ³yyn700@mail.ru

Abstract. *Background.* Among all fixed connections in mechanical engineering, tension connections are distinguished by a wide variety and make up about 20% of all connections. The article analyzes existing methods for assembling tension connections and indicates solutions for ensuring their tightness. The purpose of the work is to ensure the tightness of tension connections with a longitudinal assembly method. *Materials and methods.* The program of experimental studies is given. It is shown that control of shaping of the surface layer of mating parts in the longitudinal assembly method solves the problem of ensuring the tightness of joints. A technical solution is proposed. *Results.* The graphs of the dependence of pressing forces along the length of the joint on the value of the tension and the presence of sealant are presented. The graphs of the degree of tightness of pressed parts assembled from different materials are shown. *Conclusions.* Tension joints assembled using existing technology without sealant do not provide tightness of the joint, while the use of sealant increases the pressing force. Controlling the formation of the surface layer of the covered part is possible without complicating the design and manufacturing technology, which allows for ensuring the strength characteristics and the required tightness of the joints.

Keywords: interference fit joint, mating parts, tightness, assembly methods, shaping

For citation: Kurnosov N.E., Lebedinskiy K.V., Nakashidze Yu.Yu. Tension joints assembled by axial method and experimental determination of their tightness according to the proposed technical solution. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):98–109. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-9

Введение

Среди многочисленных типов соединений особую группу составляют неподвижные соединения с натягом, которые обеспечивают наиболее эффективное образование сборочных единиц. Соединение с натягом [1] представляет собой технологическую операцию получения условно разъемного соединения, которое получается при вставлении одной детали (или части ее) в отверстие другой детали при посадке с натягом.

К соединениям с натягом предъявляются различные требования по эксплуатационным свойствам: прочность, контактная жесткость, усталостная прочность, коррозионная стойкость и т.д. В то же время достаточно часто встречается дополнительное требование – обеспечение герметичности. Это, например: герметичность гидроаппаратуры, узлов, входящих в состав датчиков измерения давления, герметичность заклепочных соединений в авиационной промышленности, грудных валов в бумагоделательных машинах, направляющих втулок блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания и т.д. Соответственно конструктивные и технологические решения по обеспечению герметичности различны.

Большое значение для обеспечения герметичности играет величина фактической площади контакта, которая зависит от характера взаимодействия, материала, методов обработки и т.д. [1–3].

Основными способами сборки соединений с натягом в машиностроении являются поперечный способ и продольный (посредством осевого усилия пресса), при этом технология процессов сборки соединений принципиально различны [3–6].

При поперечном способе сборки для обеспечения герметичности применяются различные конструктивно-технологические решения [1, 7–10], а также решения на уровне патентов (патент РФ № 1296754, РФ № 2357111).

Для осевой сборки ввиду другого процесса многие конструктивные решения неприемлемы вследствие принципиально другого характера взаимодействия сопрягаемых поверхностей. В заклепочных соединениях герметичность достигается оптимизацией конструкторско-технологических решений [3, 5]. Известны технические решения, повышающие герметичность соединения деталей в посадках с натягом за счет применения дополнительных закладных герметизирующих элементов (патент РФ № 1315670, РФ № 2112157), т.е. необходимо введение третьего элемента, что увеличивает усилие сборки и повышает себестоимость детали.

Предлагается техническое решение, обеспечивающее прочностные свойства соединения, а также герметичность, и связанное с формообразованием поверхностного слоя и определяемое конструктивными особенностями вала и отверстия (патент РФ № 2835085).

Для проверки предлагаемого технического решения была разработана программа и методика экспериментальных исследований, проведены исследования, сделаны выводы.

Материалы и методы

Как отмечалось ранее, сборка под прессом имеет свои особенности [5] и осуществляется путем запрессовки вала в отверстие (рис. 1). Большое значение для обеспечения герметичности играет величина фактической площади контакта [1, 7], которая зависит от характера взаимодействия сопрягаемых поверхностей (рис. 2).

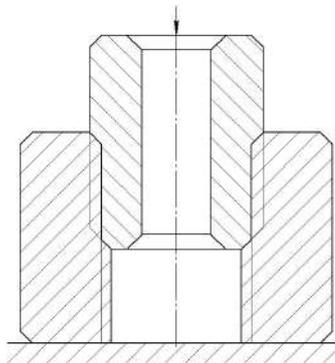


Рис. 1. Схема продольно-прессового соединения

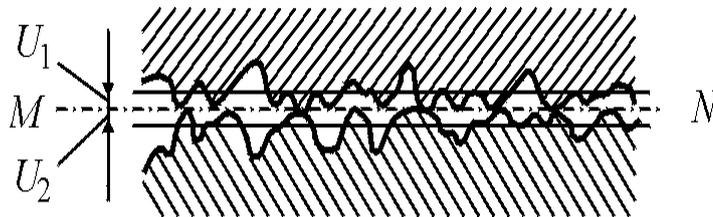


Рис. 2. Модель контактного взаимодействия сопрягаемых поверхностей при продольной сборке: U_1 , U_2 – уровни сближения контактирующих поверхностей

В качестве прототипа реального объекта исследования был выбран узел крышки цилиндра двигателя внутреннего сгорания Д50 с направляющей втулкой впускного и выпускного клапана (рис. 3).

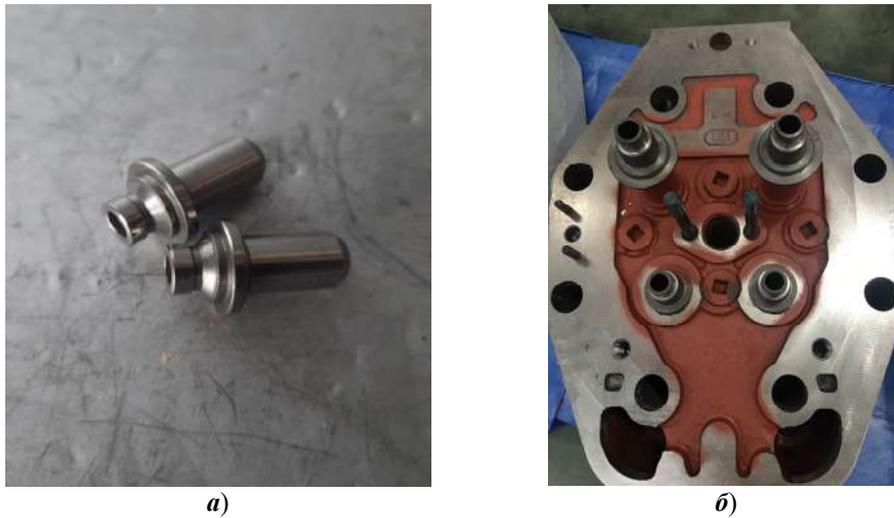


Рис. 3. Направляющая втулка и крышка цилиндра ДВС Д50: *a* – направляющая втулка впускного и выпускного клапана крышки цилиндра; *b* – крышка цилиндра

Для проведения экспериментальных исследований использовались экспериментальные образцы, соответствующие прототипу (рис. 4).

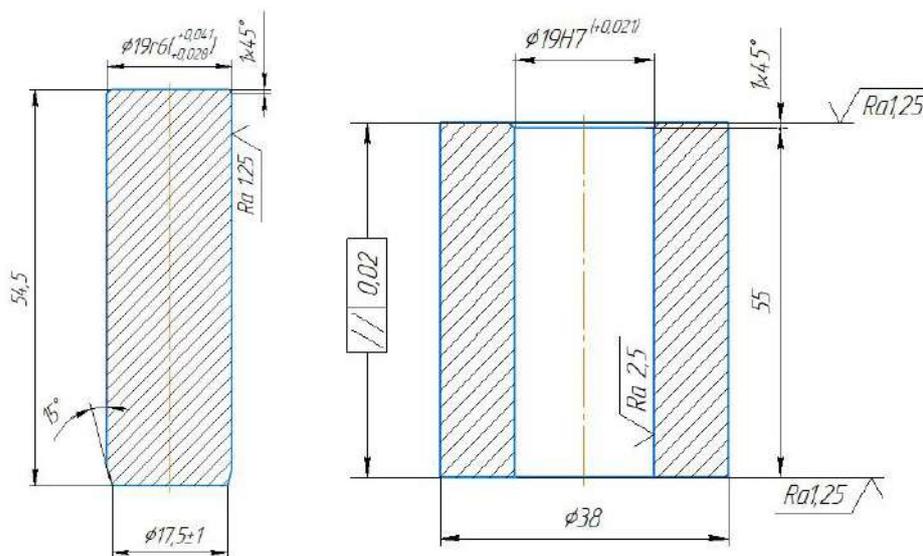


Рис. 4. Чертеж экспериментального образца: вал (охватываемая деталь); втулка (охватывающая деталь)

Для проверки и получения большей достоверности результатов экспериментальных исследований образцы изготавливались из различных материалов: вал – втулка чугун Сч20 ГОСТ 1412–85 и вал – втулка сталь С45 ГОСТ 1050–88 (рис. 5).



Рис. 5. Экспериментальные образцы; материал:
а – вал-втулка чугун Сч20; **б** – вал-втулка сталь С45

Посадочные поверхности деталей обрабатывались на токарном станке Белмаш *WL-300/535VS S229A*. Для каждого эксперимента изготавливалось по три образца. После изготовления образцов измерялись наружные диаметры валов и внутренние диаметры втулок.

Измерение проводилось Нутрометром индикаторным 109Б-1141 0, и Микрометром МК-25 в двух взаимно-перпендикулярных направлениях и по трем сечениям по длине сопряжения детали, контроль параметров шероховатости осуществлялся Профилометром 296.

В качестве результирующего рабочего размера принималось среднее значение по результатам шести измерений, причем максимальное отклонение формы детали в области сопряжения допускалось не более 20 % от величины натяга (табл. 1).

Таблица 1

Геометрические размеры деталей.

№	Материал	Вал, 1 образец, мкм		Втулка, 1 образец, мкм		Вал, 2 образец (с гермети- ком), мкм		Втулка, 2 образец (с гермети- ком). мкм		Полученный натяг <i>N</i> , мкм	
		1 сечение	2 сечение	1 сечение	2 сечение	1 сечение	2 сечение	1 сечение	2 сечение	без герметика	с герметиком
1	Чугун Сч20	19,00	-18,99	19,03	19,03	19,00	19,00	19,02	19,02	0,02	0,03
2	Сталь С45	19,02	19,03	19,04	19,04	19,02	19,02	19,03	19,03	0,03	0,04

После измерения осуществлялся подбор пар деталей, в результате которого разброс средних натягов и высотных параметров шероховатости

не превышал $\pm 10\%$ от необходимого значения. В качестве герметизирующего элемента использовался силиконовый универсальный клей-герметик ТУ 2252-51221435.

Сборка деталей соединений проводилась продольным методом путем запрессовки на гидравлическом прессе модели *Tester IP 5145-500* при скорости запрессовки от 8 до 10 мм/мин с записью диаграмм усилия запрессовки в координатах «усилие – перемещение» при помощи испытательного оборудования Точприбор-КБ, подключенного к компьютеру для фиксации результатов испытаний (рис. 6).



Рис. 6. Испытательное оборудование: *a* – гидравлический пресс *Tester IP 5145-500*; *б* – оборудование Точприбор-КБ

Для обеспечения герметичности соединений с натягом предложено техническое решение согласно патенту РФ № 2835085.

На поверхности охватываемой детали выполнялись две группы по 3–4 полукруглых кольцевых выступа, расположенных на расстоянии $l_1 = 1/3–1/5$ от концов соединения, а высота выступов соответствовала максимальному натягу плюс 10–50 %, расстояние между выступами и ширина выступов равна двукратной величине высоты выступа (рис. 7).

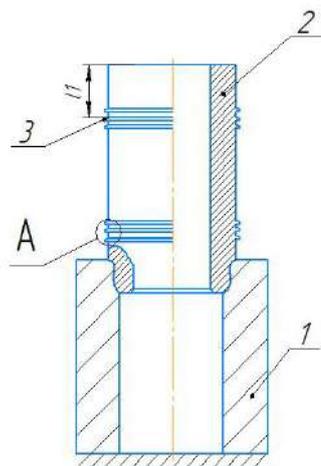


Рис. 7. Соединение с натягом

Получение выступов на валу осуществлялось на станке с числовым программным управлением ЧПУ *WATTSAN A1 1325* по заранее заданной программе.

Согласно техническому решению изготавливались образцы вала и втулки из материала чугун Сч20 ГОСТ 1412–85 и сталь С45 ГОСТ 1050–88 (рис. 8).



а)



б)

Рис. 8. Экспериментальные образцы; материал:
а – вал-втулка: чугун-чугун Сч20; б – вал-втулка: сталь-сталь С45

Перед проведением испытания на герметичность проводилась запрессовка деталей, измерялось усилие.

Результаты

Результаты зависимости усилий запрессовки от величины натяга и наличия герметика приведены на рис. 9.

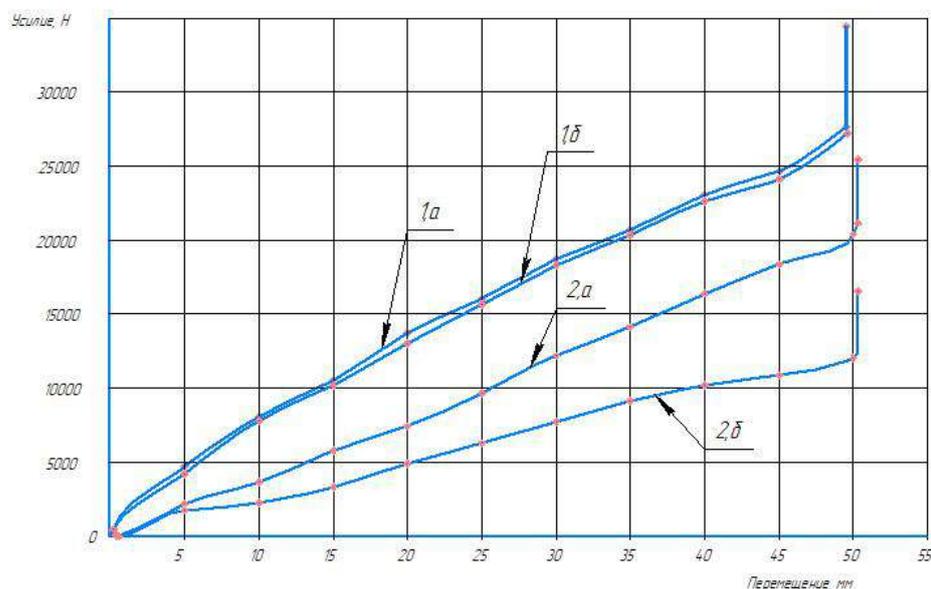


Рис. 9. Зависимость усилий запрессовки от величины натяга N и наличия герметика:
 $1a$ – без герметика, $N = 0,03$ мкм; $1б$ – без герметика, $N = 0,04$ мкм;
 $2a$ – с герметиком, $N = 0,02$ мкм; $2б$ – с герметиком, $N = 0,02$ мкм, материал чугун Сч20

Результаты зависимости усилий запрессовки от натяга, наличия герметика и технического решения показаны на рис. 10.

При использовании технического решения в зоне выступов наблюдается четко выраженный всплеск усилия запрессовки.

С целью экспериментального выявления возможной негерметичности запрессованных деталей разработана схема и изготовлен испытательный стенд (рис. 11, 12).

Программа и методика испытаний на герметичность объекта исследования разработана на основе ГОСТ 24054–80 «Методы испытаний на герметичность. Общие требования». Соединения испытывались на герметичность пузырьковым методом компрессионным способом.

Проведена проверка степени герметичности запрессованных деталей из различных материалов. В ходе эксперимента менялись следующие параметры: температура: от 50 до 250 °С, давление: от 3 до 7 МПа. Эксперимент проводился до достижения времени от 3 до 5 мин с трехкратным повторением, степень расхождения результатов не превышала 5 %. Счет производили два независимых эксперта.

Проведена проверка степени герметичности запрессованных деталей аналогично вышеуказанной методике. Получены следующие экспериментальные данные, взятые по усредненным значениям (рис. 13).

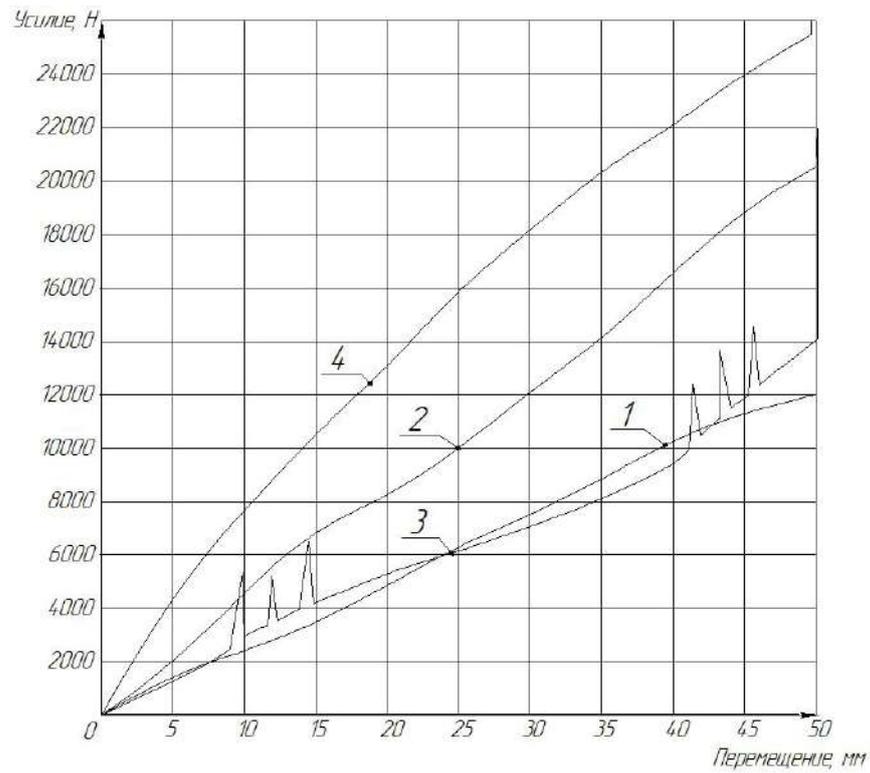


Рис. 10. Зависимость усилий запрессовки по длине соединения из разных материалов от натяга N : 1 – материал чугун-чугун Сч20, $N = 0,03$ мкм; 2 – сталь-сталь С45, $N = 0,02$ мкм; 3 – техническое решение, материал чугун-чугун Сч20, $N = 0,03$ мкм; 4 – материал чугун-чугун Сч20 с герметиком, $N = 0,03$ мкм

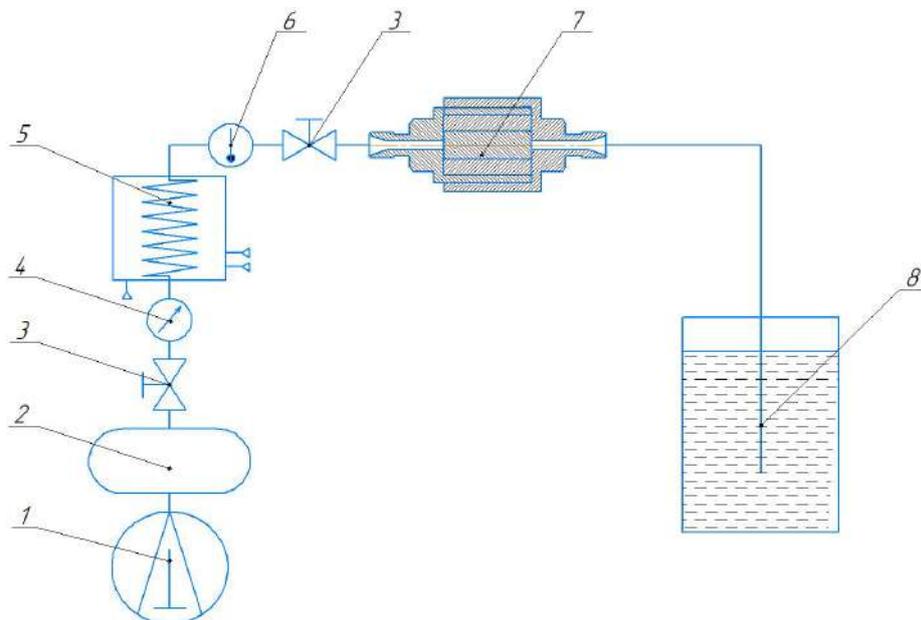


Рис. 11. Схема стенда: 1 – компрессор; 2 – манометр; 3 – кран; 4 – термометр; 5 – муфельная печь; 6 – термометр; 7 – приспособление; 8 – емкость с водой

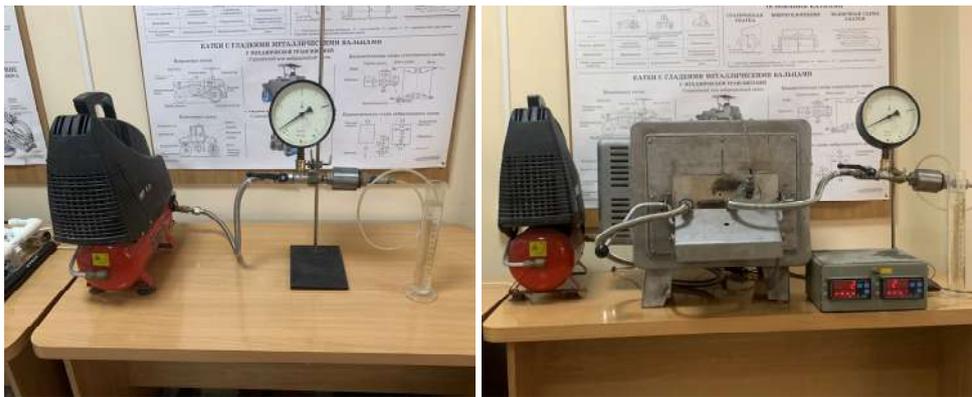


Рис. 12. Испытательный стенд

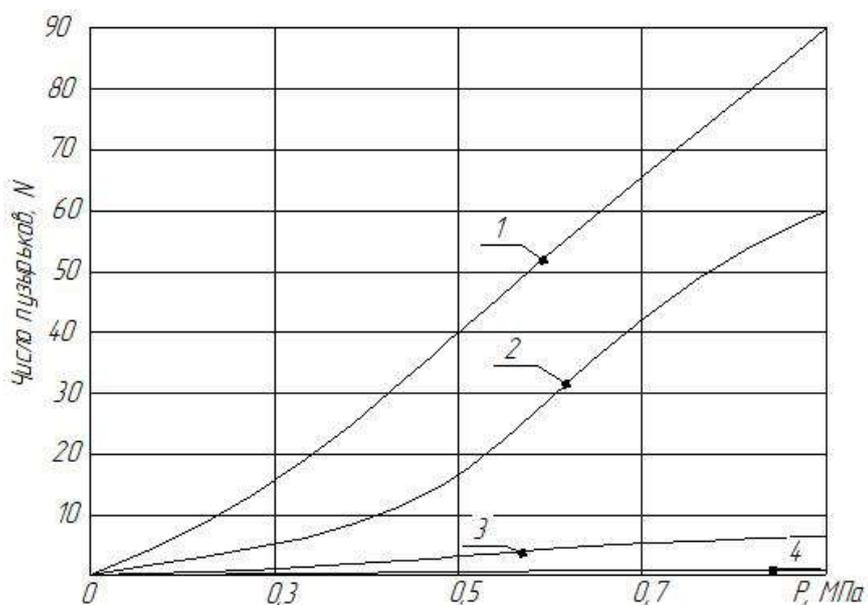


Рис. 13. Степень герметичности запрессованных деталей: 1 – материал чугун-чугун Сч20; 2 – сталь-сталь С45; 3 – чугун-чугун Сч20 с герметиком; 4 – техническое решение, материал чугун-чугун Сч20

Заключение

Соединения, изготовленные и собранные по существующей технологии без герметика, не обеспечивают герметичность соединения.

Использование универсального силиконового клея-герметика позволяет герметизировать соединение, но при этом в значительной степени увеличивается усилие запрессовки на 20–40 %.

Управление формообразованием поверхности охватываемых деталей по предлагаемому техническому решению позволяет обеспечить прочностные характеристики и требуемую герметичность соединения.

Необходимое формообразование обеспечивается при обработке охватываемой детали на станках с числовым программным управлением.

Список литературы

1. Воячек И. И. Обеспечение качества неподвижных соединений на основе интеграционной системы конструкторско-технологического проектирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.02.02. Пенза, 2006. 40 с.
2. Курносов Н. Е., Тарнопольский А. В., Накашидзе Ю. Ю. Аспекты обеспечения герметичности посадок с натягом в сложных условиях эксплуатации изделий // Транспортное машиностроение. 2022. № 7 (7). С. 24–33.
3. Шишкин С. С. Разработка метода оценки герметичности заклёпочных соединений для определения оптимальных конструктивно-технологических решений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02. Москва, 2010. 20 с.
4. Берникер Е. И. Посадки с натягом в машиностроении : справоч. пособие. М. : Машиностроение, 1966. 167 с.
5. Курносов Н. Е., Салмин В. В., Накашидзе Ю. Ю. Обеспечение герметичности соединений с натягом различными способами сборки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. № 11. С. 21–28.
6. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов. М. : Машиностроение, 1980. 592 с.
7. Еременкова И. В. Технологическое обеспечение герметичности неподвижных разъемных металлических соединений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Брянск, 2005. 13 с.
8. Евстифеева Е. А. Технологическое обеспечение прочностных характеристик соединений с натягом при сборке с анаэробными материалами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Пенза, 2009. 21 с.
9. Зенкин А. С. Технологические основы сборки соединений с натягом. М. : Машиностроение, 1982. 48 с.
10. Федулов В. М. Исследование методов расчета натяга в прессовых соединениях на основе управления технологическими условиями обработки поверхностей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Рыбинск, 2013. 16 с.

References

1. Voyachek I.I. *Quality assurance of fixed connections based on the integrated system of design and technological engineering*. DSc abstract. Penza, 2006:40. (In Russ.)
2. Kurnosov N.E., Tarnopol'skiy A.V., Nakashidze Yu.Yu. Aspects of ensuring tightness of interference fits under difficult operating conditions of products. *Transportnoe mashinostroenie = Transport engineering*. 2022;(7):24–33. (In Russ.)
3. Shishkin S.S. *Development of a method for assessing the tightness of riveted joints to determine optimal design and technological solutions*. PhD dissertation. Moskva, 2010:20. (In Russ.)
4. Berniker E.I. *Posadki s natyagom v mashinostroenii: spravoch. posobie = Interference fits in mechanical engineering: textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 1966:167. (In Russ.)
5. Kurnosov N.E., Salmin V.V., Nakashidze Yu.Yu. Ensuring tightness of tension joints using various assembly methods. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya = Repair. Restoration. Modernization*. 2024;(11):21–28. (In Russ.)
6. Novikov M.P. *Osnovy tekhnologii sborki mashin i mekhanizmov = Fundamentals of assembly technology of machines and mechanisms*. Moscow: Mashino-stroenie, 1980:592. (In Russ.)
7. Eremenkova I.V. *Technological provision of tightness of fixed detachable metal connections*. PhD dissertation. Bryansk, 2005:13. (In Russ.)
8. Evstifeeva E.A. *Technological support of strength characteristics of tension joints during assembly with anaerobic materials*. PhD abstract. Penza, 2009:21. (In Russ.)

9. Zenkin A.S. *Tekhnologicheskie osnovy sborki soedineniy s natyagom = Technological principles of assembly of tension joints*. Moscow: Mashinostroenie, 1982:48. (In Russ.)
10. Fedulov V.M. *Research of methods for calculating tension in press joints based on control of technological conditions of surface treatment*. PhD abstract. Rybinsk, 2013:16.

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Ефимович Курнос

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры транспортных
машин, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kurnosov-ne@mail.ru

Nikolay E. Kurnosov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of transport
vehicles, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Константин Валерьевич Лебединский

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры транспортных машин,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: lebedinskiy_k@mail.ru

Konstantin V. Lebedinskiy

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor of the
sub-department of transport vehicles,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Юлия Юрьевна Накашидзе

старший преподаватель кафедры
транспортных машин, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yun700@mail.ru

Yuliya Yu. Nakashidze

Senior lecturer of the sub-department
of transport vehicles, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 27.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025

УДК 621.923

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании

П. В. Малинин¹, П. Ю. Бочкарев², И. И. Артемов³, Г. А. Гончарова⁴

^{1,2,4}Камышинский технологический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета, Камышин, Россия

²Саратовский государственный университет генетики,

биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия

³Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴gga57@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Результаты исследований в области бесцентрового шлифования свидетельствуют о наличии технологического отставания в этой области. Необходимость серьезной методической перестройки теоретических основ с позиции комплексного рассмотрения процесса проходного бесцентрового шлифования позволит отразить его сущность и повысить гибкость для различных типов производства. *Материалы и методы.* Ключевым элементом работы является формализованное описание моделей взаимосвязи обрабатываемой детали с составляющими технического оснащения и процедур принятия решений на всех этапах производства. Разработан подход, основанный на анализе сил, возникающих при контакте детали с элементами технологической системы, что позволяет выявить взаимосвязи между ними и создать систему формализованных моделей, описывающих влияние широкого спектра факторов на характеристики процесса проходного бесцентрового шлифования. Для описания обобщенной модели силовых схем приводится детальное описание составляющих сил, возникающих при реализации процесса. *Результаты.* Учет в моделях особенностей способа обработки обуславливает выполнение проектной процедуры назначения рациональных технологических режимов, гарантирующих стабильность процесса во всей рабочей зоне. *Выводы.* Разработанный методический подход и формализованные соотношения системы взаимосвязанных сил отражают динамический характер операций проходного бесцентрового шлифования и служат теоретической основой для принятия объективных и обоснованных решений при технологической подготовке этих операций, обеспечивающих качество выполнения работ и повышение производительности.

Ключевые слова: проходное бесцентровое шлифование, механообрабатывающее производство, технологическая подготовка, режимы обработки, силы резания

Для цитирования: Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончарова Г. А. Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 110–125. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

A methodical approach for determining the components of forces during continuous centerless grinding

P.V. Malinin¹, P.Yu. Bochkaev², I.I. Artemov³, G.A. Goncharova⁴

© Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончарова Г. А., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

^{1,2,4}Kamyshin Technological Institute, branch of
Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russia
²Saratov State University of Genetics, Biotechnology
and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
³Penza State University, Penza, Russia

¹mpv92@yandex.ru, ²bpy@mail.ru, ³artemov@pnzgu.ru, ⁴gga57@yandex.ru

Abstract. *Background.* The results of research in the field of centerless grinding indicate that there is a technological lag in this area. The need for a serious methodological restructuring of the theoretical foundations from the perspective of a comprehensive review of the process of continuous centerless grinding will reflect its essence and increase flexibility for various types of production. *Materials and methods.* A key element of these works is a formalized description of the models of the relationship of the processed part with the components of the technical equipment and decision-making procedures at all stages of production. An approach based on the analysis of forces arising from the contact of a part with the elements of a technological system has been developed, which makes it possible to identify the relationships between them and create a system of formalized models describing the influence of a wide range of factors on the characteristics of the through-centerless grinding process. To describe the generalized model of power circuits, a detailed description of the components of the forces that arise during the implementation of the process is given. *Results.* Taking into account the specifics of the processing method in the models determines the implementation of the design procedure for assigning rational technological modes that guarantee the stability of the process throughout the work area. *Conclusions.* The developed methodological approach and the formalized relationships of the system of interrelated forces reflect the dynamic nature of through-hole centerless grinding operations and serve as a theoretical basis for making objective and informed decisions in the technological preparation of these operations, ensuring the quality of work and increased productivity.

Keywords: continuous centerless grinding, machining, technological preparation, processing modes, cutting forces

For citation: Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharova G.A. A methodical approach for determining the components of forces during continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):110–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-10

Введение

Приоритетным фактором, определяющим тенденции развития машиностроения, является удовлетворение запросов общества на изделия с заданными функциональными свойствами и установленным набором качественных характеристик. Это относится и к отдельным методам, применяемым при изготовлении продукции машиностроительных производств, в частности к процессам бесцентрового шлифования. Интересным является изучение сопоставления динамики изменения запросов общества к продукции, при изготовлении которой применяется данный метод обработки, и последовательности развития самого метода в научном, методическом и практическом аспектах [1–5]. Такое сопоставление отражает не только возможные периоды опережения или запаздывания создаваемого технологического и технического обеспечения, но и узкие места в исследовании метода применительно к современным сложившимся условиям, и прогнозную экспертизу.

Наиболее активное развитие метода обработки поверхностей деталей с использованием бесцентрового шлифования было вызвано сложившейся ситуацией в обществе, требующей резкого увеличения объема производства с удовлетворением на тот период времени (середина прошлого века) достаточно высоких показателей качества. Такие принципиальные особенности данного метода, как высокая производительность и точность, простота базирования, легкая механизация, организация поточных линий, сокращение потребности в высококвалифицированных рабочих, удачно отвечали поставленным обществом задачам и привели к активному изучению метода и научно-практическим результатам в тех направлениях, которые в большей степени отражали стоящие перед производством задачи. Приоритетные вопросы научно-исследовательских работ включали установление размеров кругов и режимов резания, типизацию технологических процессов шлифования, способы правки абразивных инструментов и их экономию, рациональную конструкцию станочного оборудования. Решение поставленных задач дало толчок стремительному развитию метода бесцентрового шлифования, ориентированному на использование в массовом и крупносерийном производстве. Расширилась область его использования, применялись различные способы внутреннего, врезного, проходного бесцентрового шлифования с использованием различных схем взаимного расположения обрабатываемых деталей, шлифовальных, ведущих кругов и их количества.

В дальнейшем методическое развитие бесцентрового шлифования длительное время было связано исключительно с доработкой и корректировкой отдельных перечисленных выше направлений исследований, что привело к периоду консервации других принципиальных научных положений в данной области. Такое состояние не позволило адаптироваться к изменяющимся потребностям общества, в первую очередь связанным с тенденцией индивидуализации потребительского спроса, приведшим к резкому возрастанию объемов многономенклатурного производства. Соответственно, сложились условия, когда и к методам бесцентрового шлифования для их эффективного использования стали предъявляться дополнительные требования, связанные с этим. И основной проблемой стала сложность и высокая трудоемкость наладки и переналадки технологического оборудования, выявилось отсутствие нормативных и промышленно апробированных методик наладки станков и управления реализацией процесса обработки с учетом реального состояния оборудования. Подход к организации производства, в котором используются станки бесцентрово-шлифовальной группы, основанный на чисто субъективных знаниях и потенциале опытных профессиональных наладчиков и технологов, со временем привел к ситуации резкого сокращения или ликвидации таких подразделений.

Материалы и методы

Проведенные исследования выявили отставание в технологическом обеспечении операций бесцентрового шлифования и указывают на необходимость серьезной методической перестройки теоретических положений, создающих условия для комплексного рассмотрения, отражающих физическую сущность процесса и повышающих его гибкость для различных типов производства. Принципиальными предпосылками выполнения данных требований

является задача создания системы автоматизированного проектирования и управления реализацией операций бесцентрового шлифования, ключевым элементом которой выступает разработка формализованного описания моделей взаимосвязи обрабатываемой детали с элементами технического оснащения и процедур принятия решений на всех этапах производства.

Проведенные авторами исследования [6–8] позволили сформулировать и экспериментально подтвердить зависимости, формализующие следующие проектные действия:

- кластеризацию методов бесцентрового шлифования по однородности выполнения проектных процедур;
- определение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования с учетом реального состояния оборудования и средств технологического оснащения;
- установление пространственных связей между элементами технологической системы и обрабатываемой деталью на всех этапах процесса обработки в рабочей зоне;
- выполнение требования силового замыкания;
- распределение величины снимаемого припуска в рамках одного перехода во всех сечениях рабочей зоны.

Операции проходного бесцентрового шлифования представляют собой сложный процесс, требующий тщательного анализа и изучения сил, возникающих в точках контакта детали и элементов технологической системы. Без глубокого понимания влияния этих сил невозможно эффективно выбрать технологическую оснастку, назначить режимы резания, настроить оборудование и управлять процессом обработки. Известные исследования в данной области в основном направлены на изучение движения детали в процессе обработки. Однако они не учитывают ряд важных аспектов, таких как изменение диаметра обрабатываемой поверхности в зависимости от динамики изменения величины снимаемого припуска, необходимость учета постоянной корректировки положения точек контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа, шлифовальным и ведущим кругами. Это не позволяет создать полноценную модель взаимодействия между составляющими силами. Кроме того, отсутствие методик оценки соблюдения условия силового замыкания в процессе обработки деталей методом бесцентрового шлифования значительно затрудняет решение задачи определения сил в точках контакта.

Для решения поставленных задач был разработан методический подход [9–11], который дает возможность объективно определить оптимальные параметры настройки и управления процессом бесцентрового шлифования с учетом текущего состояния и конструктивных особенностей оборудования и технологического оснащения. Предлагаемый подход, основанный на анализе составляющих сил, возникающих в точках контакта обрабатываемой детали с элементами технологической системы, позволяет выявить взаимосвязь между этими силами и создать систему формализованных моделей, описывающих влияние широкого спектра факторов на качественные и технико-экономические характеристики процесса проходного бесцентрового шлифования. Для описания обобщенной модели силовых схем при проходном бесцентровом шлифовании в статье приведена детализация составляющих сил.

В рассматриваемой системе нормальные силы F_n [Н], возникающие в местах контакта, зависят от массы обрабатываемой детали m [кг] и местоположения контактов. В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, при расположении центров кругов на одной горизонтальной линии (рис. 1) влияние каждого места соответствует проекции силы на направление гравитационного поля g [м/с²]:

$$F_{An} - k_{An} = \frac{\frac{d}{2} \sin c}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)};$$

$$F_{Bn} - k_{Bn} = \frac{\frac{d}{2} \sin b}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)};$$

$$F_{Pn} - k_{Pn} = \frac{\frac{d}{2} \cos(90 - a)}{\frac{d}{2} \sin c + \frac{d}{2} \sin b + \frac{d}{2} \cos(90 - a)}.$$

где d – диаметр обрабатываемой поверхности [м]; a – угол наклона опорной поверхности ножа [град].

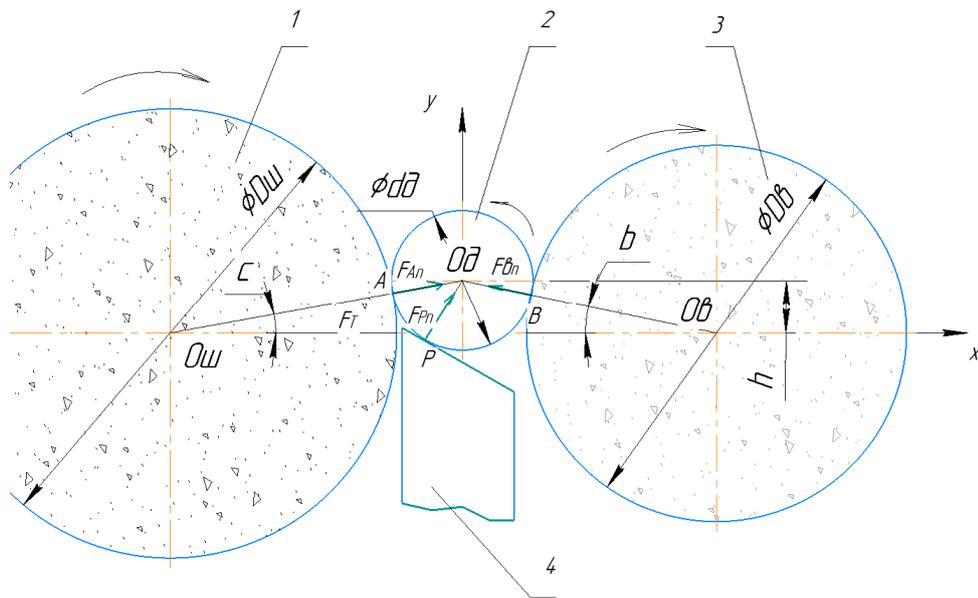


Рис. 1. Схема нормальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Значение угла между поверхностью или касательной к поверхности контакта по отношению к горизонтальной плоскости:

$$F_{An} = k_{An} m g \cos(90 - c);$$

$$F B_i n - k B_i n = \frac{\frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i))}{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i) + \frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i)) + \frac{d_i}{2} \cos(90 - a)},$$

$$F B_i n = k B_i n m g \cos(90 - m_i);$$

$$F B_i n x = F B_i n \cos(b_i + (90 - m_i)), F B_i n y = F B_i n \sin(b_i + (90 - m_i));$$

$$F P_i n - k P_i n = \frac{\frac{d_i}{2} \cos(90 - a)}{\frac{d_i}{2} \sin(90 - y_i) + \frac{d_i}{2} \sin(b_i + (90 - m_i)) + \frac{d_i}{2} \cos(90 - a)},$$

$$F P_i n = k P_i n m g \cos a; F P_i n x = F n P_i \sin(90 - a), F P_i n y = F P_i n \cos(90 - a).$$

Тангенциальные силы, возникающие в местах контакта (рис. 3), взаимосвязаны и зависят от назначенных технологических режимов обработки, реальных размеров обрабатываемой поверхности и кругов, расположения детали в зоне обработки. Характерной спецификой при рассмотрении схемы сил при проходном бесцентровом шлифовании является учет условия относительного движения соприкасающихся тел в местах контакта. Окружная сила, возникающая в месте контакта обрабатываемой поверхности и опорного ножа, зависит от скорости вращения и характеристик обрабатываемой детали и может быть определена: $F_{Pm} = \frac{T}{(d/2)}$, где T_d – крутящий момент [Н·м],

$T_d = J\omega^2 / 2$; J [кг·м²] – момент инерции для детали (элемента детали) сплошной формы, $J = \frac{1}{2}m\left(\frac{d}{2}\right)^2$, или J – момент инерции для полой детали

(элемента детали), $J = m \frac{(d_1/2)^2 + (d_2/2)^2}{2}$, $d_1/2$, $d_2/2$ – внешний и внутренний радиусы цилиндрических поверхностей детали; ω_d – угловая скорость обрабатываемой поверхности [рад/с], $\omega_d = 2\pi V_d$, V_d – скорость вращения обрабатываемой поверхности [м/с].

Окружная сила в месте контакта детали и ведущего круга имеет направление относительного смещения поверхностей. Рассматривается случай, при котором скорость вращения обрабатываемой поверхности больше скорости вращения ведущего круга:

$$F_{Bm} = \frac{T_{D_B}}{D_B / 2},$$

где D_B – диаметр ведущего круга [м]; $T_{D_B} = \frac{P_B}{\omega_d - \omega_{D_B}}$; P_B – мощность на валу ведущего круга [Вт]; $\omega_{D_B} = 2\pi V_{D_B}$; V_{D_B} – скорость вращения ведущего круга [м/с].

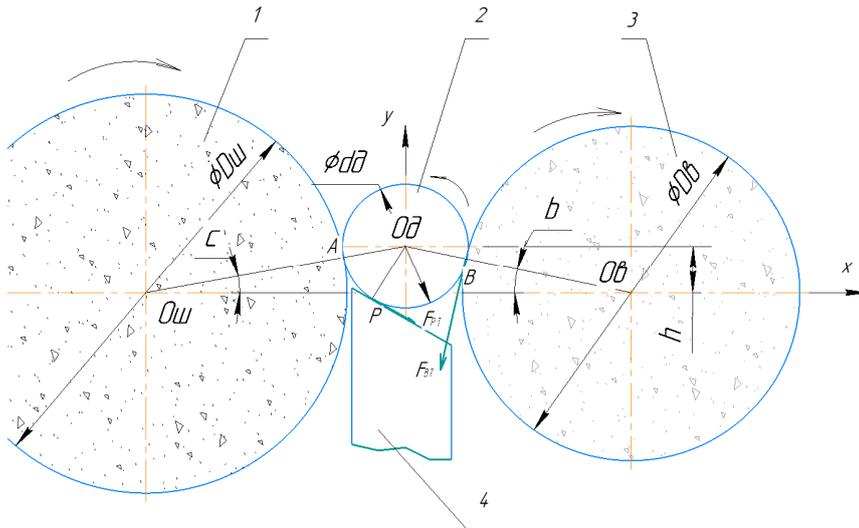


Рис. 3. Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Крутящий момент ведущего круга можно также рассчитать посредством определения момента инерции ведущего круга и оправки, на которую крепится круг.

Абсолютные составляющих тангенциальных сил на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$FB_{mx} = FBm \sin b, \quad FB_{my} = FBm \cos b;$$

$$FP_{mx} = FPn \cos(90 - a), \quad FP_{my} = FPn \sin(90 - a).$$

В i -м сечении рабочей зоны обработки имеем

$$F_{P_{i,m}} = \frac{T}{d_i/2}, \quad T_{d_i} = J_i \frac{\omega_i^2}{2}, \quad J_i = \frac{1}{2} m_i \left(\frac{d_i}{2} \right)^2.$$

$$FP_{i,mx} = F_{P_{i,m}} \cos(90 - a), \quad FP_{i,my} = F_{P_{i,m}} \sin(90 - a);$$

$$F_{B_{i,m}} = \frac{T_{D_{iB}}}{D_{iB}/2}, \quad T_{D_{iB}} = \frac{P_B}{\omega_{d_i} - \omega_{D_{iB}}}, \quad \omega_{D_{iB}} = 2\pi V_{D_{iB}}, \quad \omega_{d_i} = 2\pi V_{d_i};$$

$$FB_{i,mx} = F_{B_{i,m}} \cos(b_i + (90 - m_i)), \quad FB_{i,my} = F_{B_{i,m}} \sin(b_i + (90 - m_i)).$$

Силы трения скольжения, возникающие в местах контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом и поверхностью опорного ножа, направлены вдоль касательной к трущимся поверхностям в направлении противодействия относительному смещению поверхностей (рис. 4).

Принимаем, что величина сил зависит от прижимающей силы и скорости движения тел относительно друг друга и не зависит в соответствии с законом Кулона от величины площади трущихся поверхностей.

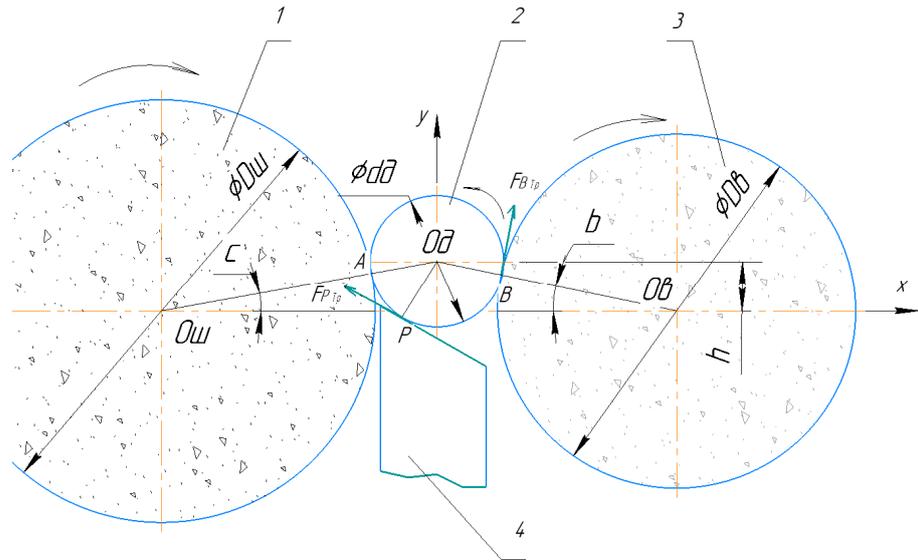


Рис. 4. Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (в i -м сечении рабочей зоны)

В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом $F_{B_{тр}} = FBn\mu_{д-в}g\beta_{д-в}$, где $\mu_{д-в}$ – коэффициент трения между обрабатываемой деталью и ведущим кругом, преимущественно зависящий от их материала и структуры ведущего круга; $\beta_{д-в}$ – коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и ведущим кругом, учитывающий состояние поверхностей, условий смазки и скоростей вращения.

Сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с опорной поверхностью установочного ножа:

$$F_{P_{тр}} = FPn\mu_{д-н}g\beta_{д-н},$$

где $\mu_{д-н}$ – коэффициент трения между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа; $\beta_{д-н}$ – коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа.

Абсолютные значения составляющих сил трения скольжения на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$FB_{тр}x = F_{B_{тр}} \cos(90 - b), \quad FB_{тр}y = F_{B_{тр}} \cos b;$$

$$FP_{тр}x = FP_{тр} \sin a, \quad FP_{тр}y = FP_{тр} \cos a.$$

В сечениях рабочей зоны обработки имеем

$$FB_{i_{тр}} = FB_i n \mu_{д-в} g \beta_{д-в}; \quad FP_{i_{тр}} = FP_i n \mu_{д-н} g \beta_{д-н};$$

$$FB_{i_{тр}}x = FB_{i_{тр}} \cos(b_i + (90 - m_i));$$

$$FB_{i_{\text{тр}}}y = FB_{i_{\text{тр}}} \sin(b_i + (90 - m_i));$$

$$FP_{i_{\text{тр}}}x = FP_{i_{\text{тр}}} \cos(90 - a), \quad FP_{i_{\text{тр}}}y = FP_{i_{\text{тр}}} \sin(90 - a).$$

В качестве методического подхода для расчета силового взаимодействия в месте контакта шлифовального круга с поверхностью детали использовались результаты исследований [12–14], основанные на изучении микро-резания единичными зернами с учетом влияния сопротивления материала обрабатываемой поверхности процессам пластического деформирования и трения. Снятие стружки вершиной абразивного зерна сопровождается возникновением силы резания F_p , являющейся геометрической суммой тангенциальной F_{pm} и нормальной F_{pn} составляющих, каждая из которых включает в себя: силу сдвига F_{ps} (в плоскости сдвига), силу трения F_{ptr} по задней поверхности зерна, инерционную силу стружки $F_{пин}$:

$$F_{psm} = \frac{\tau_s Q_{\text{ср}} \sin(\delta + \varphi_s)}{\sin \delta \sin \varphi_s}; \quad F_{psn} = \frac{\tau_s Q_{\text{ср}} \cos(\delta + \varphi_s)}{\sin \delta \sin \varphi_s},$$

где τ_s – напряжение сдвига [Па]; $Q_{\text{ср}}$ – площадь сечения среза [мм^2]; δ – угол при вершине режущей кромки [град]; φ_s – угол трения [град] $\varphi_s = \tan^{-1}(\mu_s)$; μ_s – коэффициент внутреннего трения в плоскости сдвига;

$$F_{pmpm} = \frac{\tau_s \pi \rho a_z}{\mu_s},$$

где ρ – средний радиус округления вершины [мм]; a_z – глубина резания [мм].

Зависимости [15–18] для определения инерционных сил, учитывающих инерцию стружки при изменении направления материала при переходе от обрабатываемой заготовки к стружке, позволяют вычислить тангенциальную составляющую как произведение «секундной» массы движущегося материала на изменение скорости его движения в тангенциальном направлении:

$$F_{пинт} = Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}^2 \left(\frac{1 - \sin \delta \sin \gamma}{\cos(\delta - \gamma)} \right); \quad F_{пинн} = Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}^2 \left(\frac{\sin \delta \cos \gamma}{\cos(\delta - \gamma)} \right),$$

где q_m – плотность материала [$\text{н}/\text{м}^2$]; $Q_{\text{ср}} q_m V_{\text{к}}$ – «секундная» масса движущегося материала; $V_{\text{сек}}$ – скорость движения стружки [м/с]

$$V_{\text{сек}} = V_{\text{к}} \frac{\sin \delta}{\cos(\delta - \gamma)}.$$

При реализации рассматриваемого метода проходного бесцентрового шлифования $V_{\text{к}}$ принимается как относительная скорость, учитывающая окружные скорости шлифовального круга и обрабатываемой поверхности.

Величины составляющих сил определяются суммированием составляющих сил сдвига, трения и инерции:

$$F_{pm} = F_{psm} + F_{ptrm} + F_{ринм}; F_{psn} = F_{psn} + F_{ptrn} + F_{ринн}.$$

Определение общей тангенциальной составляющей силы резания в месте контакта выполняется с учетом анализа условия перехода процесса от пластического деформирования металла к резанию a_{zmin} / ρ , a_{zmin} [мм] – минимальная толщина среза, при котором зерна еще снимают стружку:

$$F_{pm} = F_{pmрез} + F_{pmпл},$$

где $F_{pmрез}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна; $F_{pmпл}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая на зерна, совершающие только пластическое деформирование металла.

Теоретические модели расчета сил резания, возникающих в местах контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью [16], построены с учетом следующих допущений: число зерен, участвующих в процессе шлифования, колеблется в небольших пределах и принимается постоянным N_z ; усилие пластической деформации $F_{пл}$, действующей на единичное абразивное зерно, принимается пропорциональным площади среза $Q_{ср}$, $F_{пл} = \sigma_T Q_{ср}$; сила трения действует на все контактирующие зерна и рассматривается отдельно от сил $F_{пл}$, $F_{рез}$.

Тангенциальная сила резания в зоне шлифовального круга с заготовкой:

$$F_{pm} = F_{pm(рез ин)} + F_{pm(пл)} + F_{pm(тр)},$$

где $F_{pm(рез ин)}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна и определяющаяся силой сдвига и силой инерции стружки без учета силы трения;

$$F_{pm(рез ин)} = \sum_{i=1}^{N_{zрез}} F_{ps} + \sum_{i=1}^{N_{zрез}} F_{пин}, F_{pm(пл)} = \sum_{i=1}^{N_{zдеф}} F_{pпл} = \sum_{i=1}^{N_{zдеф}} \sigma_T Q_{ср},$$

$$F_{pm(тр)} = \sum_{i=1}^{N_z} F_{ptr},$$

где $N_{zрез}$, $N_{zдеф}$ – количество режущих и деформирующих зерен на единицу площади круга, определяемое по методикам [12, 16].

При расчетах нормальной составляющей силы резания F_{pn} допускается использование выражения $F_{pn} = F_{рт} / k_\varepsilon$, где табличный коэффициент [16, 19] определяется экспериментальным путем.

Описанный метод анализа сил, действующих между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью, предоставляет возможность наиболее исчерпывающе учесть все факторы, которые могут оказать влияние на процесс обработки.

Абсолютные значения составляющих сил резания в сечении рабочей зоны обработки, в которой центры шлифовального и ведущего кругов расположены на одной горизонтальной линии, на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$\begin{aligned} F_{pmy} &= F_{pm} \cos(\beta - c), \quad F_{pmx} = F_{pm} \sin(\beta - c); \\ F_{p_{тр}y} &= F_{p_{тр}} \sin(c + \varphi_s), \quad F_{p_{тр}x} = F_{p_{тр}} \cos(c + \varphi_s); \\ F_{p_{ин}y} &= F_{p_{ин}} \cos(\beta + \gamma - c), \quad F_{p_{ин}x} = F_{p_{ин}} \sin(\beta + \gamma - c). \end{aligned}$$

В i -м сечении рабочей зоны обработки:

$$\begin{aligned} F_{pmy} &= F_{pm} \cos(\beta - ((90 - y_i))), \quad F_{pmx} = F_{pm} \sin(\beta - ((90 - y_i))); \\ F_{p_{тр}y} &= F_{p_{тр}} \sin((90 - y_i) + \varphi_s), \quad F_{p_{тр}x} = F_{p_{тр}} \cos((90 - y_i) + \varphi_s); \\ F_{p_{ин}y} &= F_{p_{ин}} \cos(\beta + \gamma - (90 - y_i)), \quad F_{p_{ин}x} = F_{p_{ин}} \sin(\beta + \gamma - (90 - y_i)). \end{aligned}$$

Результаты

Представленные выражения позволяют представить взаимосвязанную систему составляющих сил процесса проходного бесцентрового шлифования во всех участках рабочей зоны обработки, что открывает возможности решения широкого спектра проектных задач на этапах разработки и реализации технологических операций.

Большинство известных зависимостей, определяющих влияние скорости резания на составляющие силы резания при бесцентровом шлифовании, охватывают только отдельные условия обработки и основаны преимущественно на экспериментальных данных. Связи с тем, что сила резания при шлифовании имеет широкий диапазон варьирования в зависимости от припуска, технологических условий обработки, материала заготовки и структуры абразивного инструмента, в качестве наиболее обобщенной характеристики процессов в зоне контакта зерен с металлом рассматривается соотношение F_{pm} / F_{pn} ; в зависимости, устанавливаемой посредством величины съема металла на единицу силы резания связь скорости резания с составляющей силы [12]. $F_{pm} \approx (1 / F_{pn})^{k_3}$, где k_3 – коэффициент, зависящий от зернистости абразивного материала (0,79–1,47).

С учетом характерных отличий рассматриваемого метода обработки, кинематических особенностей и технических возможностей применяемого оборудования становится возможным решение задачи установления предельно допустимых значений режимов обработки, обеспечивающих стабильное протекание процесса обработки в пространстве всей рабочей зоны операций проходного бесцентрового шлифования.

Заключение

На основе моделей, позволяющих устанавливать пространственное расположение мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами

технологической системы на операциях проходного бесцентрового шлифования разработан поэлементный расчет составляющих сил, возникающих в процессе реализации технологической операции. Представленные зависимости позволяют устанавливать направление и величины сил с учетом: реального состояния оборудования, средств технологического оснащения и наладочных параметров операции; размерных взаимосвязей обрабатываемой поверхности с технологической оснасткой и постоянно меняющихся мест контакта в сечениях зоны обработки; материала, конфигурации, массы и габаритов детали и параметров обрабатываемой поверхности; материала опорного ножа; структуры шлифовального и ведущего кругов; технологических режимов обработки, включающих распределение величин снимаемого припуска в рамках перехода. Созданный методический подход и разработанные формализованные соотношения системы взаимосвязанных сил отражают особенности динамического характера операций проходного бесцентрового шлифования и выступают теоретической основой принятия объективных обоснованных решений при их технологической подготовке, обеспечивающих качество выполнения работ и повышение производительности.

Список литературы

1. Справочник технолога / под общ. ред. А. Г. Сулова. М. : Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. Слонимский В. И. Теория и практика бесцентрового шлифования. Л. : МАШГИЗ, 1952. 283 с.
3. Филькин В. П., Колтунов И. Б. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования. М. : Машиностроение, 1971. 204 с.
4. Мусянко В. И., Братчиков А. Я. Бесцентровое шлифование. Л. : Машиностроение, 1986. 96 с.
5. Ашкиназий Я. М. Бесцентровые шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка. М. : Машиностроение, 2003. 352 с.
6. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2022. № 8. С. 36–39.
7. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю. Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования // Воронежский научно-технический вестник. 2024. Т. 1, № 1. С. 61–69.
8. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 144–153.
9. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 3. С. 142–156.
10. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И. Оценка условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 109–117.
11. Малинин П. В., Бочкарев П. Ю., Артемов И. И., Гончаров М. О. Взаимосвязанность сил при проходном бесцентровом шлифовании // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. С. 149–159.
12. Зубарев Ю. М., Приемьшев А. В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2010. 304 с.

13. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М. : Машиностроение, 1974. 279 с.
14. Кулаков Ю. М., Хрульков В. А., Дубинин-Барковский И. В. Предотвращение дефектов при шлифовании. М. : Машиностроение, 1975. 144 с.
15. Ваксер Д. Б. Пути повышения производительности обработки инструмента при шлифовании. Л. : Машиностроение, 1964. 123 с.
16. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М. : Машиностроение, 1974. 319 с.
17. Оробинский В. М. Абразивные методы обработки и их оптимизация. М. : Машиностроение, 2000. 314 с.
18. Евсеев Д. Г., Сальников А. Н. Модели шлифования. Теория и эксперимент. М. : Известия, 2018. 312 с.
19. Бокучава Г. В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси : СабчотаСакартвело, 1984. 234 с.

References

1. Suslov A.G. (ed.). *Spravochnik tekhnologa = Technologist's handbook*. Moscow: Innovatsionnoe mashinoostroenie, 2019:800. (In Russ.)
2. Slonimskiy V.I. *Teoriya i praktika bestsentrovogo shlifovaniya = Theory and practice of centerless grinding*. Leningrad: MASHGIZ, 1952:283. (In Russ.)
3. Fil'kin V.P., Koltunov I.B. *Progressivnye metody bestsentrovogo shlifovaniya = Progressive methods of centerless grinding*. Moscow: Mashinoostroenie, 1971:204. (In Russ.)
4. Mutsyanko V.I., Bratchikov A.Ya. *Bestsentrovoye shlifovanie = Centerless grinding*. Leningrad: Mashinoostroenie, 1986:96. (In Russ.)
5. Ashkinaziy Ya.M. *Bestsentrovyye shlifoval'nyye stanki. Konstruktsii, obrabotka i pravka = Centerless grinding machines. Design, processing and dressing*. Moscow: Mashinoostroenie, 2003:352. (In Russ.)
6. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Structuring of centerless grinding methods using cluster analysis. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University*. 2022;(8):36–39. (In Russ.)
7. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu. Grouping of longitudinal centerless grinding operations according to technological characteristics. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskyy vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. 2024;1(1):61–69. (In Russ.)
8. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Definition of setup parameters for centerless through-feed grinding operation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(3):144–153. (In Russ.)
9. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Justification of the parameters for setting up centerless grinding operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(3):142–156. (In Russ.)
10. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I. Evaluation of the condition of force closure during setup of the operation of continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2024;(4):109–117. (In Russ.)
11. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Artemov I.I., Goncharov M.O. Interrelation of forces in continuous centerless grinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskyye nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(4):149–159. (In Russ.)
12. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov: ucheb. posobie = Theory and practice of increasing the efficiency of grinding materials: textbook*. Saint Petersburg: Lan', 2010:304. (In Russ.)

13. Korchak S.N. *Proizvoditel'nost' protsessa shlifovaniya stal'nykh detaley = Performance of the steel parts grinding process*. Moscow: Mashinostroenie, 1974:279. (In Russ.)
14. Kulakov Yu.M., Khrul'kov V.A., Dubinin-Barkovskiy I.V. *Predotvrashchenie defektov pri shlifovanii = Preventing defects in grinding*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:144. (In Russ.)
15. Vakser D.B. *Puti povysheniya proizvoditel'nosti obrabotki instrumenta pri shlifovanii = Ways to improve tool performance during grinding*. Leningrad: Mashinostroenie, 1964:123. (In Russ.)
16. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov = Theory of grinding materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1974:319. (In Russ.)
17. Orobinskiy V.M. *Abrazivnye metody obrabotki i ikh optimizatsiya = Abrasive processing methods and their optimization*. Moscow: Mashinostroenie, 2000:314. (In Russ.)
18. Evseev D.G., Sal'nikov A.N. *Modeli shlifovaniya. Teoriya i eksperiment = Grinding models. Theory and experiment*. Moscow: Izvestiya, 2018:312. (In Russ.)
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya = Tribology of the grinding process*. Tbilisi: SabchotaSakartvelo, 1984:234. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Витальевич Малинин

аспирант, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Россия, г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: mpv92@yandex.ru

Pavel V. Malinin

Postgraduate student, Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University (6A Lenina street, Kamyshin, Russia)

Петр Юрьевич Бочкарев

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета (Россия, г. Камышин, ул. Ленина, 6А); профессор кафедры технического обеспечения АПК, Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова (Россия, г. Саратов, ул. Советская, 60)

E-mail: bpy@mail.ru

Petr Yu. Bochkarev

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of engineering technology, Kamyshin Technological Institute, branch of Volgograd State Technical University (6A Lenina street, Kamyshin, Russia); professor of the sub-department of technical support of the agro-industrial complex, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov (60 Sovetskaya street, Saratov, Russia)

Игорь Иосифович Артемов

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: artemov@pnzgu.ru

Igor' I. Artemov

Doctor of engineering sciences, professor, director of the Research Institute of Fundamental and Applied Research, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Галина Анатольевна Гончарова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологии
машиностроения, Камышинский
технологический институт (филиал)
Волгоградского государственного
технического университета (Россия,
г. Камышин, ул. Ленина, 6А)

E-mail: gga57@yandex.ru

Galina A. Goncharova

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of engineering
technology, Kamyshin Technological
Institute, branch of Volgograd State
Technical University (6A Lenina street,
Kamyshin, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 19.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 16.04.2025

Принята к публикации / Accepted 22.05.2025

УДК 621.762

doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

Эффект сублимации в технологии центробежно-дугового диспергирования карбида вольфрама

А. Е. Зверовщиков¹, Д. А. Борисов²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹azwer@mail.ru, ²steerman70098@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сублимация при высокотемпературном разрушении твердых сплавов влияет на формирование доли ультрадисперсных частиц. Для последующих технологий использования порошкового сырья этот эффект приводит к существенным изменениям режимов формования изделий. Определение массовой доли сублимации актуально и для оценки рентабельности метода центробежно-дугового диспергирования (ЦДД). Цель работы – создание методики теоретических вычислений, позволяющей установить, какая часть диспергируемого при помощи плазменной дуги стержня сублимирует в зависимости от условий. *Материалы и методы.* Вычисления, позволяющие спрогнозировать технологический выход сублимировавшего материала, применимы для иных технологических процессов, связанных с высокотемпературным диспергированием материалов. Приведены данные по полученным при помощи методов ЦДД и электродугового диспергирования порошков. *Результаты.* Проведены вычисления, позволяющие установить в процентах долю испарившегося и сублимировавшего карбида вольфрама в процессе используемого исследователями из Пензенского государственного университета метода ЦДД; созданы формулы, подходящие для проведения аналогичных вычислений специалистами, занятыми работами со сходными процессами. *Выводы.* На основании данных по испарению, сублимации и требуемой электроэнергии можно утверждать, что метод ЦДД подходит для проектирования автоматизированных установок промышленного типа для получения порошкового сырья для порошковой металлургии.

Ключевые слова: технология диспергирования, сублимация, карбид вольфрама, центробежно-дуговое диспергирование, уравнение Герца – Кнудсена

Для цитирования: Зверовщиков А. Е., Борисов Д. А. Эффект сублимации в технологии центробежно-дугового диспергирования карбида вольфрама // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 2. С. 126–135. doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

The sublimation effect in the technology of centrifugal arc dispersion of tungsten carbide

A.E. Zverovshchikov¹, D.A. Borisov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹azwer@mail.ru, ²steerman70098@yandex.ru

Abstract. *Background.* Sublimation during high-temperature fracture of hard alloys affects the formation of a fraction of ultrafine particles. For subsequent technologies of using powder raw materials, this effect leads to significant changes in the molding modes of products. The determination of the mass fraction of sublimation is also relevant for assessing the

profitability of the CDD method. The purpose of this work is to create a theoretical calculation methodology that makes it possible to determine which part of a rod dispersed using a plasma arc sublimates depending on the conditions. *Materials and methods.* Calculations that make it possible to predict the technological yield of sublimated material. These calculations are applicable for other technological processes related to high-temperature dispersion of materials. Data on powders obtained using CDD and EDD methods are presented. *Results.* The article contains calculations that make it possible to determine the percentage of evaporated and sublimated tungsten carbide in the process of the CDD method used by researchers from PSU; formulas have been created that are suitable for carrying out similar calculations by specialists engaged in work with similar processes. *Conclusions.* Based on data on evaporation and sublimation, as well as the required electricity, the CDD method is suitable for designing automated industrial plants for the production of powder raw materials for powder metallurgy.

Keywords: dispersion technology, sublimation, tungsten carbide, centrifugal arc dispersion, the Hertz – Knudsen equation

For citation: Zverovshchikov A.E., Borisov D.A. The sublimation effect in the technology of centrifugal arc dispersion of tungsten carbide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(2):126–135. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-2-11

Введение

Развитие аддитивных технологий формообразования и повышение безотходности при изготовлении машиностроительных изделий вплотную связано с технологиями получения порошковых материалов. Одним из перспективных методов производства порошковых материалов является получение расплава при помощи электрической дуги и его распыление центробежными силами. Проблема связи технологических режимов и фракционного состава продукта при получении порошкового сырья для современных аддитивных технологий продолжает сохранять актуальность. Сублимация части диспергируемого материала с его последующей конденсацией из газовой фазы приводит к появлению высокодисперсной фракции материала, которая, с одной стороны, может использоваться для формирования высококачественных изделий, с другой стороны, при определенной доле в сырье резко меняет технологию формования и спекания в сторону усложнения [1, 2].

Несмотря на острую необходимость прогнозирования доли сублимации в высокотемпературных технологиях, главные оценки по доли испарения базируются на эмпирических замерах. Так, для сварки распространена формула оценки мощности, подводимой к электроду [3].

Данная оценка пригодна для узкоспецифических характеристик процесса сварки и требует коррекции для применения к другим высокотемпературным технологическим процессам.

Весьма значимы работы, проведенные в смежных отраслях, где сублимацию используют для получения сверхчистых веществ, исследования фазовых переходов и других свойств материалов [4, 5]. Но в них непосредственная оценка объемов сублимации не приводится.

Данное исследование ставит целью теоретически установить основные величины и зависимости процесса сублимации карбида вольфрама при методе центробежно-дугового диспергирования (ЦДД) твердых сплавов на основании теплофизических принципов.

Материалы и методы

Проведена исследовательская работа по определению доли потерь перерабатываемого сырья при реализации метода электродуговой плавки на экспериментальной установке ЦДД [4, 6]. В основе установки – вращающийся ротор и подводимый к нему оплаваемый (расходный) стержень. В штатном режиме оплавление стержня осуществлялось электрической дугой, возникающей при подаче разнополюсного напряжения на ротор и оплаваемый стержень. Установка включала также камеру диспергирования для сбора порошкового материала, наружный корпус, приводы для вращения ротора и оплаваемого стержня и ряд других сборочных единиц [7, 8].

Методы теоретических исследований основаны на работе с имеющимися данными по основным параметрам исследуемого карбида.

В основе обозначенной проблемы лежит уравнение Герца – Кнудсена, которое связывает скорость испарения с поверхности с рядом параметров испаряемого материала:

$$w = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} (P_s - P_0), \quad (1)$$

где w – скорость испарения моль/м² · с; α_v – коэффициент, характеризующий отражающую способность поверхности, с которой происходит испарение, до получения экспериментальных данных принимается равным 1; M – молекулярная масса испаряемого вещества; k – постоянная Больцмана, $1,3805 \cdot 10^{-23}$ Дж/град; T – температура плавления карбида вольфрама, принимается равной 3073 К; P_s – парциальное давление пара испаряемого вещества; P_0 – парциальное давление пара испаряемого вещества до начала процесса, принимается равным 0.

Формула Герца – Кнудсена рассматривается как основная для расчета параметров процессов испарения, например, в работах Обнинского физико-энергетического института [9], и Чикагского университета [10].

Основная проблема при использовании данной формулы заключается в сложности определения парциального давления; однако можно отталкиваться от формулы Клапейрона – Менделеева:

$$P_s V = \frac{m}{\mu} RT, \quad (2)$$

или

$$P_s = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{RT}{V}, \quad (3)$$

где m – масса испаренного вещества; μ – молярная масса вещества; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; V – объем, в котором происходит испарение.

С подстановкой равенства (2) формула Герца – Кнудсена обретет вид

$$w = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} \cdot \frac{mRT}{\mu V} = \frac{\alpha_v m R \sqrt{T}}{\mu V \sqrt{2\pi Mk}}. \quad (4)$$

При этом следует рассматривать испарение как с расходного стержня в ходе его диспергирования, так и с образовавшихся гранул материала до их кристаллизации (сублимацию с поверхности твердого вещества будем считать пренебрежительно малой).

Кроме того, надо помнить и о проходящем в то же время процессе конденсации. Так как он зеркален по отношению к испарению, то будем исходить из того, что формула Герца – Кнудсена описывает и его:

$$w_1 = \frac{\alpha_v}{\sqrt{2\pi MkT}} (P_s - P_f), \quad (5)$$

где P_s – парциальное давление пара в начале процесса; P_f – парциальное давление пара при завершении процесса (после кристаллизации).

Введя обозначение

$$A = \frac{\alpha_v m R}{\mu V \sqrt{2\pi M k}},$$

получим выражение для скорости испарения

$$w = A \sqrt{T_{пл}} \quad (6)$$

и для скорости конденсации

$$w_1 = A \sqrt{T_s} - A \sqrt{T_{пл}}, \quad (7)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления карбида вольфрама; T_s – температура начала конденсации.

При этом предполагается, что температура расходного стержня постоянна (и в начале, и в завершении процесса) – это температура плавления, которая неизменна. То есть $T_s = T_{пл}$, и испарение не происходит; пар на этом участке насыщенный.

Примем гипотезу, что процесс испарения продолжается от начала перемещения капли из зоны, обогреваемой электрической дугой, по траектории, определяемой инерционным силовым полем, до момента достижения температуры кристаллизации, которая равна температуре плавления.

Из полученных выражений для w и w_1 можно получить соотношение скоростей конденсации и испарения:

$$\frac{w_1}{w} = \frac{A \sqrt{T_s} - A \sqrt{T_{пл}}}{A \sqrt{T_{пл}}} = \frac{\sqrt{T_s}}{\sqrt{T_{пл}}} - 1 = 0,063.$$

Соответственно, коэффициент, характеризующий испарение с учетом конденсации, будет равен 0,937.

При определении параметров, входящих в формулу для определения скорости испарения, будем исходить из того, что тепловая энергия, поступающая в частицу, распределяется между молекулами согласно стандартному нормальному распределению с пиковым значением, соответствующим величине удельной теплоты плавления карбида вольфрама.

При стандартном нормальном распределении плотность вероятности некой величины x определяется по экспоненциальной формуле

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}. \quad (8)$$

В нашем случае будем рассматривать x как соотношение некоего количества теплоты, поступившего в гранулу, с удельной теплотой плавления карбида вольфрама: $x = Q / Q_{\text{пл}}$. Причем в рассматриваемом случае интерес представляет соотношение удельной теплоты испарения с удельной теплотой плавления, т.е. определение плотности вероятности того, сколько молекул получают энергию, достаточную для пересечения границы «расплав–газ», т.е. для испарения:

$$x = \frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{пл}}}. \quad (9)$$

Для большинства неметаллов соотношение между теплотой плавления и теплотой испарения [11] составляет примерно от 1:4 до 1:12. Выберем среднее значение при соотношении 1:8, что при оценочных расчетах вполне допустимо.

Для этого исследования решено рассмотреть результаты работы по получению частиц порошка карбида вольфрама методом ЦДД, в рамках которой были получены гранулы средним диаметром 4,17 мкм [8]. Масса такой гранулы $598740 \cdot 10^{-18}$ кг $\approx 6 \cdot 10^{-13}$ кг.

Молярная масса определена для WC как $183,85 + 12 = 195,85$ грамм/моль, или $0,19585$ кг/моль. Молекулярная масса M определена как произведение обратного числа Авогадро на абсолютную молекулярную массу WC : $1,673 \cdot 10^{-27} \cdot 195,85 = 3,28 \cdot 10^{-25}$ кг. Объем V рассчитан как объем камеры диспергирования: $V = 0,157$ м³.

Результаты

Подставляя найденные в предыдущем разделе значения в формулу для определения плотности вероятности

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{Q_{\text{исп}}}{Q_{\text{пл}}} \right)^2}, \quad (10)$$

получим вероятность нагрева молекулы карбида вольфрама в грануле до температуры испарения $\varphi = 4,4 \cdot 10^{-15}$.

Масса пара m равна произведению массы гранулы на φ :

$$m = 6 \cdot 10^{-13} \cdot 4,4 \cdot 10^{-15} = 2,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Подставляя полученные значения в формулу для определения скорости испарения, получим скорость испарения с поверхности одной гранулы:

$$w = 7,306 \cdot 10^{-3} \text{ моль/м}^2 \cdot \text{с.}$$

С учетом того, что площадь поверхности сферической гранулы диаметром 4,17 мкм $S = \pi d^2 = 54,63 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$, скорость истечения пара с поверхности гранулы равна

$$W = w \cdot S = 4 \cdot 10^{-13} \text{ моль/с.}$$

Масса истекающего пара:

$$m_1 = W \cdot \mu = 7,834 \cdot 10^{-14} \text{ кг/с.}$$

Формула, устанавливающая зависимость между радиусом гранулы r и временем ее конденсации τ , определена в [12]:

$$\chi(\tau) = 1 - \exp \left\{ -\frac{4}{3} \pi \int_0^{\tau} J(t) \left[r + \int_t^{\tau} U(t) dt \right]^3 dt \right\}. \quad (11)$$

Интегрируя и подставляя численные значения в эту формулу, получим время кристаллизации гранулы диаметром 4,17 мкм – 0,29 мкс.

Окончательно масса испарившегося с поверхности гранулы вещества равна произведению m_1 на время кристаллизации τ и поправочный коэффициент, учитывающий конденсацию пара, равный 0,937. В результате получаем

$$M_1 = 7,834 \cdot 10^{-14} \cdot 0,29 \cdot 0,937 = 2,13 \cdot 10^{-14} \text{ кг.}$$

С учетом массы гранулы $6 \cdot 10^{-13} \text{ кг}$ определим, что потери на испарение с ее поверхности в ходе электродугового диспергирования методом ЦДД составляют 3,5 %.

Обсуждение

Таким образом, в рамках проведенной исследовательской работы был получен показатель потерь при сублимации карбида вольфрама, равный 3,5 %. В ходе опытной работы в качестве основного способа оплавления расходного стержня был использован метод ЦДД. Согласно ряду авторитетных источников [13, 14] потери металла при дуговой плавке составляют от 3 до 9 % (средний показатель – 7,9 %). То есть расчетный показатель потерь на испарение карбида вольфрама при плавке расходного стержня методом ЦДД практически совпадает с показателем потерь при ныне преобладающих вариантах получения порошкового материала электродуговыми (ЭДД) и плазменными методами. Таким образом, мы можем говорить о приемлемости метода ЦДД как альтернативы методам электродугового и плазменного диспергирования с точки зрения минимизации потерь.

В сравнении с работой [15] можно увидеть выигрыш в применяемом напряжении – 53 В в методе ЦДД [3] против 100 В в электроэрозионном диспергировании (ЭЭД) (притом стали, а не карбида вольфрама). В работе [16] также отмечено применение напряжения в диапазонах от 80 до 160 В.

В то же время метод ЦДД обеспечивает более сбалансированные размеры частиц меньших размеров, чем полученные методом ЭДД. Так, по результатам фракционного анализа партии порошка, полученного методом

ЦДД из смеси карбида вольфрама и полукарбида вольфрама в лаборатории НПО «Старт» (г. Заречный, Пензенская обл.) средний размер частицы 16,16 мкм (общий вес партии 85 г). В то же время согласно источнику [15] по результатам двух опытных работ с использованием сырья на основе стали ШХ15 получены методом ЭЭД две партии порошка со средним размером частиц 21,2 мкм, т.е. с незначительным превышением среднего размера частиц, полученных методом ЦДД. При этом коэффициент элонгации составил 2,4, т.е. форма частиц приближается к чешуйчатой, что является отрицательным фактором при спекании порошка. В то же время коэффициент элонгации частиц, полученных методом ЦДД, составляет 1,09, т.е. форма частиц близка к сферической.

Метод воздействия потоком плазмы был исследован в целях получения более стабильного процесса оплавления расходного стержня. И, как показывают результаты серии опытов, удалось реализовать процесс диспергирования со штатными показателями по размерам и отклонению гранул от сферической формы в постоянном режиме без корректировки его в ходе оплавления серии заготовленных расходных стержней.

Заключение

Потери на сублимацию расходного материала сравнимы с потерями, типичными для иных процессов, использующих электрическую дугу.

Напряжение, используемое в методе ЦДД, меньше, чем у аналогов, что дает конструктивные преимущества и экономит энергию.

Вариант диспергации с оплавлением расходного материала при помощи метода ЦДД может быть эффективен при проектировании автоматизированных установок промышленного типа для получения сырья для порошковой металлургии.

Список литературы

1. Байрамов Р. К. Разработка процессов получения высокодисперсных порошков при электроэрозии металлов в водных растворах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.06. М., 2010. 255 с. EDN: QFDSIT
2. Дворник М. И. Разработка физико-химических и технологических основ переработки вольфрамокобальтового твердого сплава электроэрозионным диспергированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Хабаровск, 2006. 117 с. EDN: NNWКОН
3. Зверовщиков А. Е., Киреев С. Ю., Розен А. Е. [и др.]. Формирование гетерогенных структур в процессе центробежно-дугового диспергирования материалов на основе карбида вольфрама. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 158 с. EDN: RONACM
4. Патент № 2746197 С1 Российская Федерация, МПК В22F 9/10, В22F 9/14. Способ получения мелкодисперсного порошка тугоплавкого материала / Зверовщиков А. Е., Зверовщиков В. З., Колмаков К. М., Борисов Д. А. № 2020115605 ; заявл. 11.05.2020 ; опубл. 08.04.2021 ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». EDN: CMAAQS
5. Павлов В. П., Кудоярова В. М. Математическое моделирование физико-химического эффекта процесса сублимации на поверхности теплозащитного покрытия из полимерного композиционного материала при интенсивном высокотемпературном нагреве // Решетневские чтения. 2012. Т. 2. С. 499–500. EDN: UNKZWT

6. Гончарова Л. М. Сублимационная кристаллизация функциональных слоев в микроразмерных ростовых ячейках : дис. ... канд. физ.-матем. наук : 01.04.07. Новочеркасск, 2019. 116 с. EDN: RHVQGO
7. Патент № 2754226 С1 Российская Федерация, МПК В22F 9/08, В22F 9/14. Способ получения мелкодисперсного металлического порошка / Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А., Розен А. Е. № 2020138344 ; заявл. 23.11.2020 ; опубл. 30.08.2021 ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет». EDN: BPWMVY
8. Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А. О повышении производительности установок для заготовки сырья порошковой металлургии // Техника и технология современных производств : сб. ст. II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Пенза, 12–13 апреля 2021 года). Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 34–37. EDN: ISMMLJ
9. Зверовщиков А. Е., Нестеров С. А., Борисов Д. А. [и др.]. Установка для электродугового диспергирования тугоплавких материалов с активацией поверхности воздействием лазера на базе станка VTM // Актуальные проблемы станкостроения – 2023 : сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Пенза, 1–3 июня 2023 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. С. 97–102. EDN: SWUAIQ
10. Просветов В. В., Пророк Л. М. К вопросу о давлении пара на жидкость при испарении и конденсации. М. : Физико-энергетический институт, 1976. 20 с.
11. Fedkin A. V., Grossman L., Ghiorso Mark S. Vapor pressures and evaporation coefficients for melts of ferromagnesian chondrule-like compositions // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70 (1). P. 206–223. doi: 10.1016/j.gca.2005.08.014
12. Zverovshchikov A., Tarantsev K., Borisov D. Determination of the parameters of the spray area during electric arc dispersion of the material // *Materials Today-Proceedings*. 2021. Vol. 38. P. 1452–1453. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08
13. Фокин И. В., Гудим Ю. А. Структура потерь металла в процессе выплавки нержавеющей стали // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2013. Т. 13, № 2. С. 33–37. EDN: RLYRTL
14. Макаров Г. Н. Экспериментальные методы определения температуры и теплоты плавления кластеров и наночастиц // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180, № 2. С. 185. EDN: LKFJUT
15. Хардинов С. В. Разработка способа получения порошковых материалов путем электроэрозионного диспергирования шарикоподшипниковой стали : дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2017. 193 с.
16. Агеев Е. В. Исследование и практическое применение порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.09. М., 2012. 35 с. EDN: QIISIB

References

1. Bayramov R.K. *Development of processes for obtaining highly dispersed powders during electrical erosion of metals in aqueous solutions*. DSc dissertation. Moscow, 2010:255. (In Russ.). EDN: QFDSIT
2. Dvornik M.I. *Development of physical-chemical and technological principles for processing tungsten-cobalt hard alloy by electrical discharge dispersion*. PhD dissertation. Khabarovsk, 2006:117. (In Russ.). EDN: NNWKOH
3. Zverovshchikov A.E., Kireev S.Yu., Rozen A.E. et al. *Formirovanie geterogennykh struktur v protsesse tsentrobezhno-dugovogo dispergirovaniya materialov na osnove karbida vol'frama = Formation of heterogeneous structures in the process of centrifugal-arc dispersion of materials based on tungsten carbide*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:158. (In Russ.). EDN: RONACM

4. Patent № 2746197 C1 Russian Federation, MPK B22F 9/10, B22F 9/14. *Sposob polucheniya melkodispersnogo poroshka tugoplavkogo materiala = Method for producing finely dispersed powder of refractory material.*. Zverovshchikov A.E., Zverovshchikov V.Z., Kolmakov K.M., Borisov D.A. № 2020115605; appl. 11.05.2020; publ. 08.04.2021; applicant federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzskiy gosudarstvennyy universitet». (In Russ.). EDN: CMAAQS
5. Pavlov V.P., Kudoyarova V.M. Mathematical modeling of the physical and chemical effect of sublimation process on the surface of heat-protective coating made of polymer composite material under intense high-temperature heating. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev readings.* 2012;2:499–500. (In Russ.). EDN: UNKZWT
6. Goncharova L.M. *Sublimation crystallization of functional layers in micro-sized growth cells.* PhD dissertation. Novocherkassk, 2019:116. (In Russ.). EDN: RHVQGO
7. Patent № 2754226 C1 Russian Federation, MPK B22F 9/08, B22F 9/14. *Sposob polucheniya melkodispersnogo metallicheskogo poroshka = Method for producing finely dispersed metal powder.* Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A., Rozen A.E. № 2020138344; appl. 23.11.2020; publ. 30.08.2021; applicant federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Penzskiy gosudarstvennyy universitet». (In Russ.). EDN: BPWMVY
8. Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A. On increasing the productivity of installations for the procurement of raw materials for powder metallurgy. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennykh proizvodstv: sb. st. II Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (Penza, 12–13 aprelya 2021 goda) = Equipment and technology of modern production: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference with international participation (April 12-13, 2021, Penza).* Penza: Izd-vo PGU, 2021:34–37. (In Russ.). EDN: ISMMLJ
9. Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Borisov D.A. et al. Installation for electro-laboratory dispersion of refractory materials with surface activation by laser action based on the VTM machine. *Aktual'nye problemy stanko-stroeniya – 2023: sb. st. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (Penza, 1–3 iyunya 2023 g.) = Current issues in machine tool construction – 2023: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation (June 1-3, 2023, Penza).* Penza: Izd-vo PGU, 2023:97–102. (In Russ.). EDN: SWUAIQ
10. Prosvetov V.V., Prorok L.M. *K voprosu o davlenii para na zhidkosti' pri isparenii i kondensatsii = On the issue of vapor pressure on liquid during evaporation and condensation.* Moscow: Fiziko-energeticheskiy institut, 1976:20. (In Russ.)
11. Fedkin A.V., Grossman L., Ghiorso Mark S. Vapor pressures and evaporation coefficients for melts of ferromagnesian chondrule-like compositions. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2006;70(1):206–223. doi: 10.1016/j.gca.2005.08.014
12. Zverovshchikov A., Tarantsev K., Borisov D. Determination of the parameters of the spray area during electric arc dispersion of the material. *Materials Today-Proceedings.* 2021;38:1452–1453. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08
13. Fokin I.V., Gudim Yu.A. Structure of metal losses in the process of smelting stainless steel. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya = Bulletin of the South Ural State University. Series: metallurgy.* 2013;13(2):33–37. (In Russ.). EDN: RLYRTL
14. Makarov G.N. Experimental methods for determining the temperature and heat of melting of clusters and nanoparticles. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in physical sciences.* 2010;180(2):185. (In Russ.). EDN: LKFJUT
15. Khardikov S.V. *Development of a method for obtaining powder materials by electroerosive dispersion of ball bearing steel.* PhD dissertation. Bryansk, 2017:193. (In Russ.)
16. Ageev E.V. *Research and practical application of powders obtained by electrical discharge dispersion of waste tungsten-containing hard alloys.* DSc abstract. Moscow, 2012:35. (In Russ.). EDN: QIISIB

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Евгеньевич Зверовщиков

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Aleksandr E. Zverovshchikov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of technologies and equipment
of mechanical engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Дмитрий Алексеевич Борисов

ведущий инженер кафедры технологии
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: steerman70098@yandex.ru

Dmitry A. Borisov

Leading engineer of the
sub-department of technologies
and equipment of mechanical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 13.02.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 18.04.2025

Принята к публикации / Accepted 29.05.2025

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные направления (группы специальностей):

2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений) (технические науки)

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки)

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки)

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки)

2.3.2. Вычислительные системы и их элементы (технические науки)

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)

2.5.6. Технология машиностроения (технические науки)

2.5.9. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. +7 (8412) 64-32-89. E-mail: volgavuz@pnzgu.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.