ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 2 (54) 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Тычков А. Ю., Волкова К. Ю., Киселева Д. В., Родионова Е. А. Обзор систем виртуальной реальности 3

Гура Д. А., Дубенко Ю. В., Марковский И. Г. Разработка концепции интеллектуального блока обработки данных в системе мониторинга мостов с применением сканирующих технологий 14

Чернышов А. В. Модель надежности долговременного хранения информации на оптических дисках, объединенных в гибридные структуры..... 25

Подрезов Д. Р. Анализ системных связей показателей функционирования технологического блока и решение задачи выбора вариантов подсчета запасов на основе геофизических данных 34

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

Ашанин В. Н., Коротков А. А. Реализация интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с промежуточной широтно-импульсной модуляцией 43

Востоков Н. Г., Горбунов А. С. Снижение электромагнитного излучения электронного устройства с помощью технологии размытия спектра..... 54

Федорова А. А., Васильев М. А., Васильев С. А. Математическая модель траектории замера участков поверхности почвы круговым сканированием лазерным профилографом 65

Щелоков Е. А. Метод повышения точности измерений и показателей достоверности измерений оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов 78

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Рубцов В. Ю., Шевченко О. И., Алыпов П. А., Лебедев В. А. Мелющие шары повышенной точности 86

Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю. Влияние технологических отклонений параметров репрезентативных ячеек на сопротивление деформированию и разрушению полимерных слоистых композиционных материалов..... 97

UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION

ENGINEERING SCIENCES

№ 2 (54) 2020

CONTENT

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Tychkov A. Yu., Volkova K. Yu., Kiseleva D. V., Rodionova E. A. A review of virtual reality systems 3

Gura D. A., Dubenko Yu. V., Markovskiy I. G. Development of the concept of the intelligent data processing unit in the bridge monitoring system using scanning technologies 14

Chernyshov A. V. Model of reliability of long-term storage of information on optical disks united in hybrid structures 25

Podrezov D. R. Analysis of system connections of the technological unit functioning indicators and solving the problem of choosing options for reserve calculation based on geophysical data 34

ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT AND RADIO ENGINEERING

Ashanin V. N., Korotkov A. A. Implementation of an integrating analog-digital converter with intermediate pulse latestimation modulation 43

Vostokov N. G., Gorbunov A. S. Reduction of the electromagnetic radiation of an electronic device using the spread spectrum technology 54

Fedorova A. A., Vasil'ev M. A., Vasil'ev S. A. Mathematical model of the measuring trajectory of the soil surface areas by circular scanning with a laser profilograph 65

Shchelokov E. A. A method of measurement precision and index validity improvement for an optoelectronic converter of micrometeoroids motion parameters 78

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I., Alypov P. A., Lebedev V. A. Grinding balls with particular accuracy 86

Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. The influence of parameters' technological deviations of representative cells on resistance to deformation and fracture of polymer layer composite materials 97

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.032.6
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-1

А. Ю. Тычков, К. Ю. Волкова, Д. В. Киселева, Е. А. Родионова

ОБЗОР СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Объектом исследования являются системы виртуальной реальности, представляющие собой уникальные программируемые средства погружения пользователя в условно смоделированную среду. Предметом исследования является изучение свойств известных и ранее разработанных устройств виртуальной реальности, достоинств и недостатков с точки зрения масштабирования в различных отраслях науки и техники. Цель работы – провести аналитический литературный обзор и анализ известных устройств виртуальной реальности, представить наиболее перспективные решения с точки зрения безбоязненного использования для решения в различных технологических задачах.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования использовался поисковый метод научных и научно-популярных работ в лицензированных российских и зарубежных базах *E-library* и *Scopus* по ключевым словам: *VR*, *virtual reality*, *history*, *review*.

Результаты. Представлены тренды развития виртуальной реальности в разрезе информационных, инженерных и потребительских решений. Рассмотрены современные виртуальные устройства, особенности их применения и сравнительные характеристики.

Выводы. Виртуальная реальность на современном этапе развития может стать необходимой формой поддержки принятия решения, с помощью которой можно значительно повысить эффективность работы специалистов в различных сферах деятельности.

Ключевые слова: виртуальная и дополненная реальность, позиционирование пользователя, передача данных, разрешение экрана.

A. Yu. Tychkov, K. Yu. Volkova, D. V. Kiseleva, E. A. Rodionova

A REVIEW OF VIRTUAL REALITY SYSTEMS

[1] Материалы публикации подготовлены при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-71-20029-п).

© Тычков А. Ю., Волкова К. Ю., Киселева Д. В., Родионова Е. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The object of research is virtual reality systems, which are unique means of immersing the user in a conditionally modeled environment. The subject of the work is the study of the properties of known and previously developed virtual reality devices, advantages and disadvantages in terms of scaling in various branches of science and technology. The purpose of the work is to conduct an analytical literature review and analysis of known virtual reality devices, to present the most promising solutions in terms of fearless use for solving various technological problems.

Materials and methods. The materials of the investigation was the search method of scientific and popular scientific works in Russian and foreign licensed databases E-library and Scopus by keyword: VR, virtual reality, history, review.

Results. Presents the trends of virtual reality in the context of engineering and consumer decisions. Modern virtual devices, features of their application and comparative characteristics are considered.

Conclusions. Virtual reality at the present stage of development may become a necessary form of decision support, with which you can significantly improve the efficiency of the work of specialists in the various fields of activity.

Keywords: virtual and augmented reality, user positioning, data transmission, screen resolution.

Введение

В настоящее время, в эпоху информационных технологий, глобальной сети Интернет и дистанционной работы в различных сферах деятельности, широкую популярность получил термин «виртуальная реальность» (лат. *virtus* – потенциальный, возможный; лат. *realis* – действительный, существующий). Виртуальная реальность (*virtual reality*, *VR*) – это искусственно созданный с помощью компьютера трехмерный мир, воспринимаемый человеком посредством специальных устройств [1].

Технология виртуальной реальности формирует виртуальное сообщество, которое отличается от окружающего реального мира. *VR* способна воздействовать на все органы чувств человека и сделать восприятие виртуального пространства максимально естественным.

Обзор известных систем VR

Технология *VR* прошла длинный путь от первых экспериментов в 50-х гг. XX в. до современных шлемов виртуальной реальности в 20-х гг. XXI в. Известны два подхода к формированию систем *VR*: виртуальная комната и носимые устройства.

К носимым устройствам *VR* относятся нашлемные индикаторы и очки виртуальной реальности. Основная задача их заключалась в формировании стереоскопического изображения на сетчатке глаз. Простейшей *VR*-системой является стереоскоп, разработанный в 1837 г. английским физиком Чарльзом Уинстоном [2]. Стереоскоп – это первое оптическое устройство для просмотра фотографий и рисунков (рис. 1,***а***).

Спустя ровно 120 лет в 1957 г. Мортон Хейлинг создал систему *Sensorama*, которая обеспечивала иллюзию реальности с помощью 3D-фильма со стереозвуком, запахами и вибрациями [3].

Уже в 1961 г. был изобретен первый шлем со стереоскопической гарнитурой *Headsight* [4]. С помощью камеры оператор, находящийся в шлеме, мог наблюдать за происходящим вокруг нее, а шлем передавал на камеру данные о поворотах головы (рис. 1,***б***).

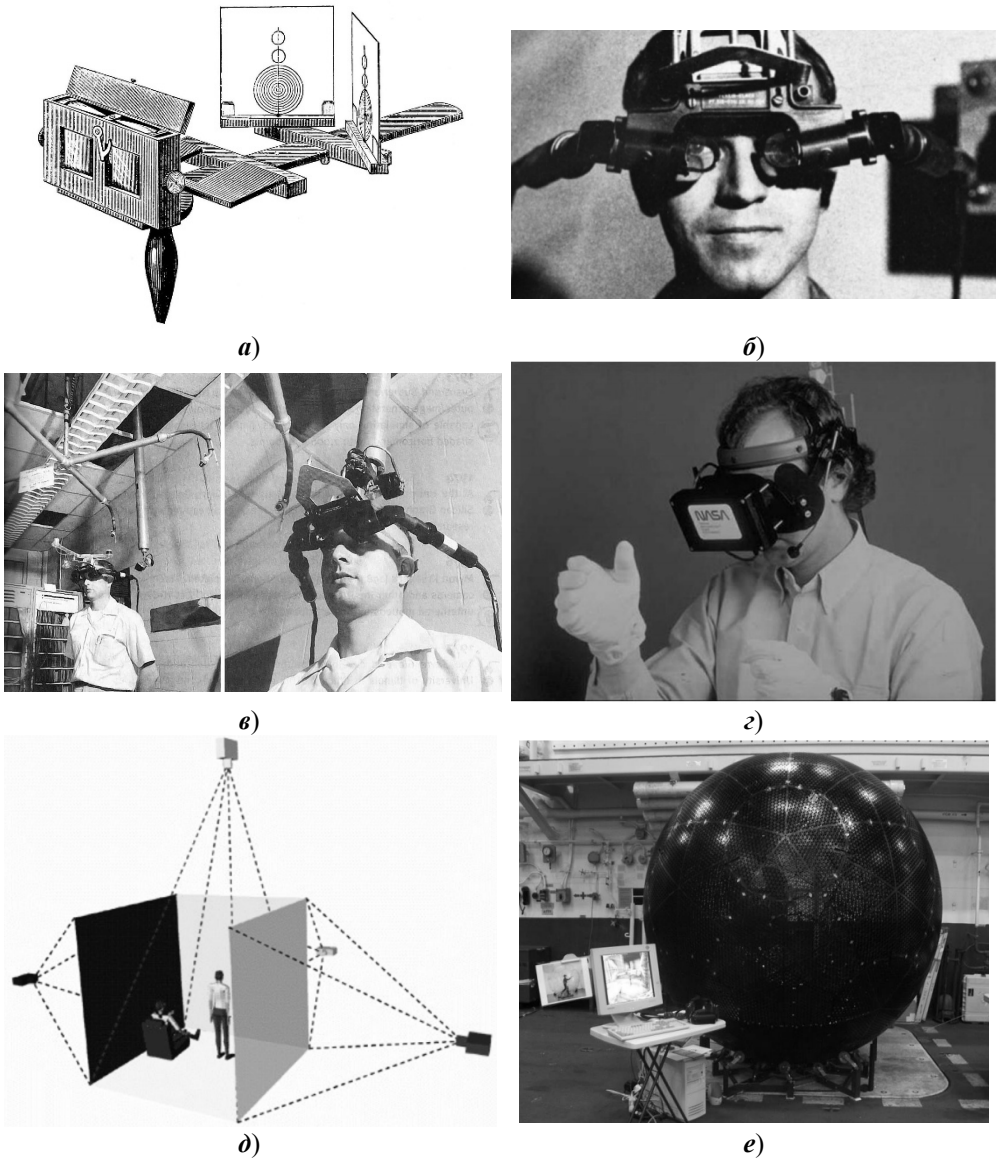


Рис. 1. Разновидности устройств *VR*: ***а*** – оптический стереоскоп; ***б*** – *Headsight*; ***в*** – *Sword of Damocles*; ***г*** – *VIEW*; ***д*** – *The Cave*; ***е*** – *VirtuSphere*

В 1968 г. профессор Гарвардского университета Айвен Эдвард Сазерленд создал видеошлем *Sword of Damocles* (рис. 1,***в***), который осуществлял трансляцию изображений, отслеживание движений пользователя, наложение компьютерной графики на реальные объекты [5].

В 1989 г. компания *NASA* разработала *Virtual Environment Workstation* (рис. 1,***г***) – прототип оригинальной системы виртуальной реальности с использованием сенсорной перчатки, шлема виртуальной реальности и технологий распознавания голоса [6].

В 1992 г. Дэн Сэндин, Том ДеФанти и Каролина Круз-Нейра разработали первую комнату виртуальной реальности *The Cave* [7], представляющую

собой комнату, на стены которой проецировались стереоскопические изображения (рис. 1,***д***).

В 1995 г. братья Латыповы разработали систему под названием *VirtuSphere* [8]. Внутри конструкции пользователь способен передвигаться в любом направлении и на любое расстояние без ограничений реального пространства (рис. 1,***е***).

В 2002 г. компания *Essential Reality* выпустила продукт под названием *P5 GLOVE* (рис. 2,***а***) – перчатка со встроенной системой слежения за положением руки в пространстве [9].

Рис. 2. Разновидности устройств *VR*: ***а*** – *P5 GLOVE*; ***б*** – *CyberGlove* II; ***в*** – *AcceleGlove*; ***г*** – *Oculus Rift*; ***д*** – *Google Cardboard*; ***е*** – *HTC Vive*

В 2005 г. компания *Immersion Corporation* выпустила перчатку *CyberGlove* II [10]. В отличие от предыдущих моделей, перчатка обладала беспроводностью посредством *Bluetooth*, а также позволяла почувствовать пользователю физическое воздействие виртуальной среды (рис. 2,***б***).

В 2009 г. американская компания *AnthroTronix* [11] выпустила первую в мире программируемую перчатку виртуальной реальности *Accele Glove*. Считывание движений пальцев рук, их положение относительно плеч и всего тела фиксируются с помощью акселерометров, которые надеваются на запястья рук и над локтем (рис. 2,***в***).

В 2012 г. Лаки Палмер, основатель компании *Oculus VR*, продемонстрировал шлем-дисплей виртуальной реальности (рис. 2,***г***). В процессе создания устройства были исследованы такие функции, как трехмерная стереоскопия, беспроводная связь и широкий обзор в 270° [12].

В 2014 г. компания *Google* создала доступное и простое решение под названием *Google Cardboard* (рис. 2,***д***) – картонная рамка, в которую вкладывается смартфон со специально установленным приложением [13].

В 2015 г. компания *HTC* совместно с *Valve Corporation* выпустила систему виртуальной реальности *HTC Vive* [14]. Система состоит из шлема виртуальной реальности, двух беспроводных контроллеров для управления действием, двух базовых станций, которые отслеживают движение пользователя, наушников и коммуникационного модуля для подключения к компьютеру (рис. 2,***е***).

В 2016 г. компанией *Sony* произведен шлем *VR*, обеспечивающий работу приставки *PlayStation* [15]. Управление виртуальной реальностью осуществлялось посредством специализированных контроллеров, а движение пользователя в шлеме – посредством камеры. Очки виртуальной реальности проецировали пользователю экран меню и режимы работы.

В 2019 г. компания *HTC* [16] выпустила гарнитуру *HTC VIVE COSMOS*. В устройстве осуществляется позиционирование пользователя с помощью встроенных в шлем камер. Применяемые *LCD*-панели с более плотным расположением пикселей минимизируют «эффект москитной сетки» (*screen – door effect*).

В табл. 1 приведены основные технические характеристики большинства рассмотренных ранее устройств *VR*. Сопоставляя шлемы *VR Oculus Rift* разного поколения DK1 и DK2, отметим, что за два года выхода продукта DK2 в 2 раза увеличила разрешение экрана, повысила частоту смены кадров, стала использовать матрицу *AMOLED*.

Развитие устройств *VR* за последнюю декаду позволило получить пользователям адаптивные контроллеры, увеличение разрешения экрана более чем в 2 раза, увеличение частоты смены кадров с 60 Гц до оптимальных 90 Гц, обеспечивая лучшее качество продукта. Кроме того, заметно различие в каналах передачи данных: от *HDMI* и *USB* до *Bluetooth* и *Display Port*. Однако одним из основных недостатков существующих систем виртуальной реальности является длительная привыкаемость пользователей к смене сюжетных событий в условиях погружения в смоделированные среды. Необходимо решение этой задачи посредством адаптации существующих систем виртуальной реальности под каждого пользователя индивидуально, с учетом физиологических и физических способностей каждого человека. Это позволит создать новое поколение систем адаптивной виртуальной реальности и расширить пользовательские преимущества известных систем.

Таблица 1

Сравнение основных технических характеристик VR-гарнитур

Название устройства VR	Характеристики устройств VR					
	Разрешение для каждого глаза	Частота смены кадров, Гц	Угол обзора, °	Разъемы	Матрица	Контроллеры
2012 г. Oculus Rift – DK1	640×800	60	110	HDMI, USB	LCD	–
2014 г. Oculus Rift – DK2	960×1080	75	100	HDMI, USB	AMOLED	Xbox One, X-Rover GUN
2016 г. PlayStation VR	960×1080	90-120	100	HDMI, USB	OLED-RGB	Dualshoc 4, PS Move, Aim Controller
2016 г. StarVR	1440×2560	90	210	USB Type-C, USB, Display Port	AMOLED	–
2016 г. Oculus Rift CV1	1080×1200	90	110	USB	AMOLED	Oculus Touch, Oculus Sensor
2018 г. HTC Vive PRO	1440×1600	100	110	USB, Bluetooth, Display Port	AMOLED	Головные контроллеры и две базовые станции Steam VR
2019 г. HTC Vive Cosmos	1440×1700	90	110	USB, Display Port	AMOLED	2 контроллера HTC Vive Cosmos

Сферы применения *VR*

Широкое применение виртуальной реальности наблюдается в игровом мире. В 2016 г. студия *Nyantic* выпустила *PokemonGo* [17] – игру в дополненной реальности, охватившую более 100 млн человек.

Виртуальная реальность позволят пользователю ощутить эффект полного присутствия на массовых мероприятиях. Научные конференции и концерты можно посещать из любой части планеты из офиса или дома.

Спортивный канал *Fox Sports Eredivisie*, посвященный голландской футбольной лиге, провел первую в истории трансляцию матча Фейеноорд – Эйндховен с использованием систем *VR* компании *BeyondSports* [18]. За событиями на поле пользователь может наблюдать глазами вратаря, нападающего или полузащитника.

Для съемки фильмов с *VR* используются специальные камеры, обеспечивающие круговые панорамы на 360° [19]. Компания Грин РумВоркерс [20] разработала интерактивный аттракцион с дополненной реальностью, в котором использовалась технология 360°.

Технологии *VR* привлекает пользователей в сферу продажи недвижимости. Компания *Planoplan* [21] разработала автоматизированный сервис для создания 3D-туров по квартирам в строящихся домах.

Технологии *VR* начинает применяться в сферах образования, позволяя приспосабливаться ученикам (пользователям) к сложным учебным процессам в интерактивной форме. Компания *Google* продвигает в школах проект *Cardboard* [22]. Компания *AR production* выпустила мобильное приложение [23], которое позволяет видеть дополненную реальность в обычных школьных учебниках.

Виртуальная реальность находит широкое применение в здравоохранении, для лечения фобий и психических расстройств, проведения виртуальных приемов [24]. При помощи *VR* врачи могут быстро получить доступ к любой необходимой информации (данные о пациенте и результаты анализов). В литературе встречаются работы [25] по созданию в виртуальном пространстве различных стрессовых ситуаций для лечения и реабилитации пациентов. Британская компания *Tribemix* создала программу *Dementia VR* [26] для лечения старческой деменции. Компания *PSYCHO* [27] разработала прототип хирургического *VR*-симулятора для лапароскопии, в котором используется высокоточная навигация и отслеживание тактильной связи органов и тканей оперируемого.

VR применяются в обучении летчиков, пехоты, военных медиков [28], позволяя солдатам погрузиться в условия, максимально приближенные к боевым действиям, но без опасности для их жизни. Разработка *BAE Systems* – шлем *Q-warrior* – позволяет в *VR* отслеживать огневые точки противника и состояние бойцов.

Посредством *VR*-технологий специалисты строительных компаний моделируют дома и сооружения [29]. Система виртуальной реальности подключается к инструментам автоматизированного проектирования.

Заключение

Анализ литературы по тематике исследования показал, что число работ, в которых рассматриваются вопросы развития виртуальной реальности в раз-

личных предметных сферах, достаточно широк. Запросы по ключевым словам в российских и зарубежных базах *E-library* и *Scopus* (*VR, virtual reality, history, review*) показали, что более чем в 1000 публикациях в год рассматриваются вопросы применения виртуальной реальности в различных сферах: от инженерии до медицины. В результате анализа работ установлено, что отечественными учеными за последние 5 лет опубликовано 1420 статей в ведущих рейтинговых журналах, включенных в *E-library* и *Scopus*, по тематике исследования настоящей статьи. Виртуальная реальность на современном этапе развития может стать необходимой формой поддержки принятия решения, с помощью которой можно значительно повысить эффективность работы в различных сферах деятельности. Необходимо детально изучать данную технологию на предмет ее положительного и отрицательного влияния на пользователя, совершенствовать инженерные разработки и создавать новые оригинальные решения.

Библиографический список

1. **Кондратьев, И.** Технология – виртуальная, результат – реальный / И. Кондратьев // Computerworld. – 2007. – № 35. – 32 с.
2. Tapani Levola Diffractive optics for virtual displays // SID (Society for Image Display). – 2006. – Vol. 14/5. – 12 p.
3. The History of Virtual Reality. – URL: https://www.avadirect.com/blog/the-history-of-virtual-reality/
4. **Jerald, J.** The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality / J. Jerald. – New York : Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, 2016. – 636 p.
5. **Линовес, Дж.** Виртуальная реальность в Unity / Дж. Линовес ; пер. с англ. Рагимов Р. Н. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 316 с.
6. NASA Virtual Environment Workstation. – URL: http://www.warrenrobinett.com/nasa/index.htm
7. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности : учеб. пособие / А. А. Смолин, Д. Д. Жданов, И. С. Потемин, А. В. Меженин, В. А. Богатырев. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2018. – 59 с.
8. **Осипов, М. П.** Системы виртуальной реальности : учеб.-метод. пособие / М. П. Осипов. – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. – 48 с.
9. Компьютерные перчатки. – URL: https://3dnews.ru/167155
10. Virtual Realities LLC. – URL: https://www.vrealities.com/
11. Kristina Grifantini Open-Source Data Glove // MIT Technology. – 2009.
12. Walter Galan Oculus Rift Development Kit 2 Teardown. – URL: https://www.ifixit.com/Teardown/Oculus+Rift+Development+Kit+2+Teardown/27613
13. Google Cardboard – картонный шлем виртуальной реальности. – URL: http://www.proghouse.ru/article-box/15-cardboard
14. The history of virtual reality. – URL: https://www.musictech.net/features/trends/virtual-reality-history/
15. История создания PlayStationVR. – URL:https://got.vg/article/kak_sozdavalsja_playstation_vr-161016/
16. Особенности HTC VIVE COSMOS. – URL: https://www.vive.com/ru/product/vive-cosmos/features/
17. Игры будущего: дополненная и виртуальная реальность. – URL: https://www.m24.ru/articles/nauka/24082016/114124
18. VR-трансляции реального футбола: будущее уже здесь. – URL: https://gmbox.ru/materials/28987-vr-translyatsii-realnogo-futbola-budushchee-uzhe-zdes

19. Будущее VR видео. – URL: https://habr.com/ru/post/429414/
20. Оригинальные франшизы. – URL: https://printcolibri.ru/original-franchises-the-pawnshop-franchise-is-growth-during-the-fall/
21. Неигровое применение Unity3D и Oculus Rift. – URL: https://habr.com/ru/company/kelnik/blog/198572/
22. Google Cardboard. – URL: https://arvr.google.com/cardboard/
23. **Петрухина, О. В.** Графический дизайн и виртуальная среда: реальность и перспективы / О. В. Петрухина // Философия и культура. – 2019. – № 1. – С. 13–19.
24. **Баранов, А. А.** Архитектура универсальной интерактивной системы на базе современных устройств взаимодействия с пользователем / А. А. Баранов // Современные научные исследования и инновации. – 2015. – № 4, Ч. 1. – 69 с.
25. Игровая система виртуальной реальности в реабилитации детей с прогрессирующими мышечными дистрофиями / Н. А. Николенко, О. В. Гончарова, С. Б. Артемьева, Е. Е. Ачкасов, Е. Б. Литвинова // Спортивная медицина: наука и практика. – 2014. – № 4. – С. 90–97.
26. Virtual Dementia Experience. – URL: https://www.dementia.org.au/information/resources/technology/virtual-dementia-experience
27. Диагностика, лечение и научные исследования в виртуальной реальности. – URL: http://vrcorp.ru/?p=1570
28. Posts Tagged «VR для военных». – URL: http://ve-group.ru/tag/vr-dlya-voennyih
29. BIM, VR, AR: как новые технологии меняют строительство. – URL: https://vc.ru/future/93499-bim-vr-ar-kak-novye-tehnologii-menyayut-stroitelstv

References

1. Kondrat'ev I. *Computerworld*. 2007, no. 35, 32 p.
2. *SID (Society for Image Display)*. 2006, vol. 14/5, 12 p.
3. *The History of Virtual Reality*. Available at: https://www.avadirect.com/blog/the-history-of-virtual-reality/
4. Jerald J. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Realit*. New York: Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool, 2016, 636 p.
5. Linoves Dzh. *Virtual'naya real'nost' v Unity* [Virtual reality in Unity] transl. from Engl. By Ragimov R. N. Moscow: DMK Press, 2016, 316 p. [In Russian]
6. *NASA Virtual Environment Workstati*on. Available at: http://www.warrenrobinett.com/nasa/index.htm
7. Smolin A. A., Zhdanov D. D., Potemin I. S., Mezhenin A. V., Bogatyrev V. A. *Sistemy virtual'noy, dopolnennoy i smeshannoy real'nosti: ucheb. posobie* [Virtual, augmented and mixed reality systems: teaching aid]. Saint-Petersburg: Universitet ITMO, 2018, 59 p. [In Russian]
8. Osipov M. P. *Sistemy virtual'noy real'nosti: ucheb.-metod. posobie* [Virtual reality systems: teaching aid]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2012, 48 p. [In Russian]
9. *Komp'yuternye perchatki* [Computer gloves]. Available at: https://3dnews.ru/167155 [In Russian]
10. *Virtual Realities LLC*. Available at: https://www.vrealities.com/
11. *MIT Technology*. 2009.
12. *Walter Galan Oculus Rift Development Kit 2 Teardown*. Available at: https://www.ifixit.com/Teardown/Oculus+Rift+Development+Kit+2+Teardown/27613
13. *Google Cardboard – kartonnyy shlem virtual'noy real'nosti*. Available at: http://www.proghouse.ru/article-box/15-cardboard [In Russian]
14. *The history of virtual reality*. Available at: https://www.musictech.net/features/trends/virtual-reality-history/

15. *Istoriya sozdaniya PlayStationVR* [History of PlayStationVR creation]. Available at:https://got.vg/article/kak_sozdavalsja_playstation_vr-161016/ [In Russian]
16. *Osobennosti HTC VIVE COSMOS* [Features of HTC VIVE COSMOS]. Available at: https://www.vive.com/ru/product/vive-cosmos/features/ [In Russian]
17. *Igry budushchego: dopolnennaya i virtual'naya real'nost'* [Games of the future: augmented and virtual reality]. Available at: https://www.m24.ru/articles/nauka/24082016/114124 [In Russian]
18. *VR-translyatsii real'nogo futbola: budushchee uzhe zdes'*. [Real football VR streams: the future is here] Available at: https://gmbox.ru/materials/28987-vr-translyatsii-realnogo-futbola-budushchee-uzhe-zdes [In Russian]
19. *Budushchee VR video* [The future of VR video]. Available at: https://habr.com/ru/post/429414/ [In Russian]
20. *Original'nye franshizy* [Original franchises]. Available at: https://printcolibri.ru/original-franchises-the-pawnshop-franchise-is-growth-during-the-fall/ [In Russian]
21. *Neigrovoe primenenie Unity3D i Oculus Rift* [Non-gaming use of Unity3D and Oculus Rift]. Available at: https://habr.com/ru/company/kelnik/blog/198572/ [In Russian]
22. *Google Cardboard*. Available at: https://arvr.google.com/cardboard/
23. Petrukhina O. V. *Filosofiya i kul'tura* [Philosophy and culture]. 2019, no. 1, pp. 13–19. [In Russian]
24. Baranov A. A. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern researches and innovations]. 2015, no. 4, part 1, 69 p. [In Russian]
25. Nikolenko N. A., Goncharova O. V., Artem'eva S. B., Achkasov E. E., Litvinova E. B. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika* [Sports medicine: science and practice]. 2014, no. 4, pp. 90–97. [In Russian]
26. *Virtual Dementia Experience*. Available at: https://www.dementia.org.au/information/resources/technology/virtual-dementia-experience
27. *Diagnostika lechenie i nauchnye issledovaniya v virtual'noy real'nosti* [ ]. Available at: http://vrcorp.ru/?p=1570 [In Russian]
28. *Posts Tagged «VR dlya voennykh»* [Posts Tagged: “VR for militaries”]. Available at: http://ve-group.ru/tag/vr-dlya-voennyih [In Russian]
29. *BIM, VR, AR: kak novye tekhnologii menyayut stroitel'stvo* [BE, VR, AR: how new technologies are changing construction]. Available at: https://vc.ru/future/93499-bim-vr-ar-kak-novye-tehnologii-menyayut-stroitelstv [In Russian]

Тычков Александр Юрьевич
доктор технических наук, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований; доцент, кафедра радиотехники и радиоэлектронных систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich
Doctor of engineering sciences, deputy director of the research institute for basic and applied studies; associate professor, sub-department of radio engineering and radioelectronic systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Волкова Кристина Юрьевна
студентка, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Volkova Kristina Yur'evna
Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Киселева Дарья Вячеславовна
студентка, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Kiseleva Dar'ya Vyacheslavovna
Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Родионова Екатерина Алексеевна
студентка, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Rodionova Ekaterina Alekseevna
Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Образец цитирования:

Тычков, А. Ю. Обзор систем виртуальной реальности / А. Ю. Тычков, К. Ю. Волкова, Д. В. Киселева, Е. А. Родионова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 3–13. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-1.

УДК 004.9 ; 303.732.4
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-2

Д. А. Гура, Ю. В. Дубенко, И. Г. Марковский

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО БЛОКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА МОСТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СКАНИРУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Целью работы является поиск путей автоматизации процесса обработки данных при мониторинге технического состояния мостов. Объектом исследования является система мониторинга сооружений транспортной инфраструктуры различных типов, базирующаяся на технологии трехмерного лазерного сканирования как способе оценки степени их износа. Предмет исследования – автоматизированный комплекс для обработки данных лазерного сканирования – интеллектуальный блок мониторинга, создание его концепции.

Материалы и методы. Исследование выполнено методом синтеза модели системы мониторинга, апробируемой коллективом для специальных нужд с последующей ее декомпозицией и разбиением на основные структурные элементы.

Результаты. Составлена схема структуры создаваемой системы мониторинга мостовых сооружений. Разработана и описана концепция ее интеллектуальной подсистемы. Представлен комплекс по созданию трехмерных копий реальных объектов в виде его модели типа «черный ящик» с изложением механизма его работы. Посредством методологии IDEF0 сформирована блок-схема работы и взаимодействия элементов интеллектуальной подсистемы мониторинга мостов с математическим описанием ее состояний.

Выводы. В результате проделанной работы сделаны выводы о наиболее эффективных путях модернизации процедуры мониторинга мостов в целом. Предлагаемое решение в виде единой интеллектуальной системы мониторинга позволяет устранить выявленные проблемы. Кроме того, такой комплекс может учитывать скорость и динамику развития деформаций, что является очень важным критерием при построении прогнозов остаточного срока службы объекта и рекомендаций по проведению ремонтных работ.

Ключевые слова: системный анализ, интеллектуальные системы, мониторинг объектов транспортной инфраструктуры, лазерное сканирование, построение трехмерных моделей.

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края Российской Федерации в рамках научного проекта № 19-48-233020 «Исследование возможности использования комплекса трехмерного лазерного сканирования для мониторинга и обеспечения безопасности инфраструктурных объектов в городе Краснодаре и Краснодарском крае».

Исследование выполнено в рамках инициативной комплексной научно-исследовательской работы АААА-А18-118121290132-9 «Теория и методы исследования данных лазерного сканирования для целей управления цифровой инфраструктурой».

© Гура Д. А., Дубенко Ю. В., Марковский И. Г., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

D. A. Gura, Yu. V. Dubenko, I. G. Markovskiy

DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF THE INTELLIGENT DATA PROCESSING UNIT IN THE BRIDGE MONITORING SYSTEM USING SCANNING TECHNOLOGIES

Abstract.

Background. The aim of the work is to find ways to automate the process of data processing while monitoring the technical condition of bridges. The object of the research in the article is a system for monitoring the structures of transport infrastructure of various types, based on the technology of three-dimensional laser scanning, as a way of assessing the degree of wear. Subject of research is an automated complex for processing laser-scanning data – an intelligent monitoring unit. Creation of his concept.

Materials and methods. The study was performed by the synthesis method of a model of a monitoring system, tested by the team for special needs, followed by its decomposition and partitioning into the main structural elements.

Results. The structure of the created monitoring system for bridge structures has been drawn up. The concept of its intellectual subsystem is developed and described. A complex is presented for creating three-dimensional copies of real objects in the form of its model of the "black box" type with an outline of the mechanism of its operation. Using the IDEF0 methodology, a block diagram of the operation and interaction of the elements of the intelligent bridge monitoring subsystem with a mathematical description of its states is formed.

Conclusions. As a result, conclusions about the most effective ways to modernize the bridge monitoring procedure as a whole are drawn. The proposed solution in the form of a single intelligent monitoring system eliminates the identified problems. In addition, such a complex can take into account the speed and dynamics of the development of deformations, which is a very important criterion when making forecasts of the remaining service life of the facility and recommendations for repair work.

Keywords: system analysis, intelligent systems, monitoring of transport infrastructure facilities, laser-scanning, construction of three-dimensional models.

Введение

Мониторинг как средство наблюдения за состоянием объектов и изменениями, которым они подвержены, имеет огромное значение во многих отраслях науки и техники. Одна из основных задач мониторинга – предупреждение внештатных и аварийных ситуаций на инженерных сооружениях и объектах инфраструктуры, т.е. обеспечение их безопасности. Необходимо отметить, что ее выполнение напрямую зависит от качества проведенных работ, которое определяется надежностью и точностью применяемых технических средств. Создание системы мониторинга с использованием современных технологий и способов получения данных сможет решить указанные цели в полной мере.

В настоящее время наиболее популярен метод наблюдения за техническим состоянием инженерного сооружения, при котором измерения проводятся через определенные интервалы времени. Он является наиболее рациональным способом мониторинга для большинства объектов строительства, не требующим постоянного технического контроля. Традиционным приемом

для проведения такого рода работ сейчас служат различные методы нивелирования: геометрическое, тригонометрическое, гидростатическое, фотограмметрическое, микронивелирование и др. Однако он имеет ряд недостатков, которые могут существенно повлиять на достоверность отчета о состоянии обследуемого объекта.

Методика таких работ заключается в наблюдениях за горизонтальным и вертикальным перемещением марок, устанавливаемых в различных частях сооружений, с помощью теодолитов или тахеометров. Минусами такого подхода являются [1]:

1. Недоступность большинства деталей мостов, неизменность положения которых нужно определять. На многих деталях моста невозможно установить нивелирную рейку или веху с призмой.

2. Трудности в выборе стабильного места в районе моста для опорных пунктов: близкие к мосту пункты нестабильны из-за паводков, удаленные от моста пункты дают дополнительную погрешность.

3. Существенные погрешности, а в ряде случаев и невозможность измерения расстояний тахеометром при острых углах между линией визирования и плоскостью наблюдений.

4. Большое влияние человеческого фактора на всех этапах работ.

Таким образом, встает вопрос о поиске способов автоматизации данной процедуры в целях повышения объективности получаемых данных. В работе описана идея создания экспериментальной системы мониторинга мостов, а также других объектов транспортной инфраструктуры, базирующейся на технологии лазерного сканирования и интеллектуальной системе обработки его данных. Обозначены ее основные составляющие, преимущества, выявленные недостатки и возможные пути их устранения. Научная новизна представленной работы заключается в комплексности исследования, его междисциплинарности и масштабе проводимых работ.

Методика получения первичных данных

В качестве эксперимента для анализа целесообразности и эффективности применения наземного лазерного сканирования для целей мониторинга объектов транспортной инфраструктуры соответствующие процедуры измерений были проведены на Тургеневском мосту города Краснодара системой наземного лазерного сканирования. Преимущества такого способа получения первичных данных в сравнении с традиционными методами измерений описаны в многочисленных статьях по данной тематике [2–5].

Результатом процедуры стала трехмерная модель сооружения – рис. 1.

Наземное лазерное сканирование отлично подходит для сбора информации о техническом состоянии объектов инфраструктуры. По его данным можно отслеживать трещины асфальтобетонного покрытия, деформации несущих конструкций, откол бетона и т.д. – рис. 2.

Однако, проводя изыскания на практике с целью поиска наиболее эффективных инструментов для сбора первичных данных, авторы столкнулись с проблемой их последующей обработки. Данная часть процедуры требует автоматизации вследствие большой доли влияния человеческого фактора. Кроме того, время, которое занимают камеральные работы, зачастую не позволяет оперативно оценить техническое состояние сооружения.

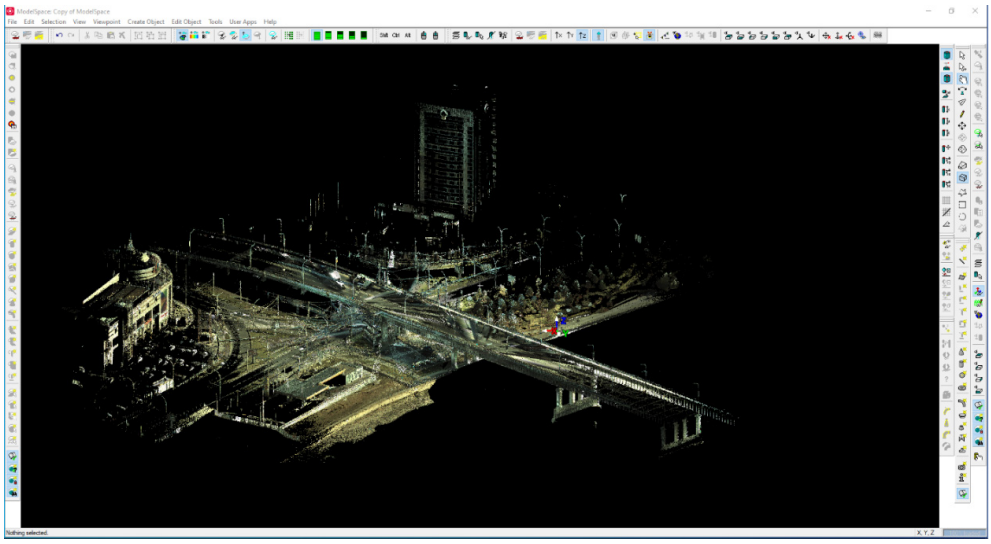


Рис. 1. Облако точек Тургеневского моста города Краснодара

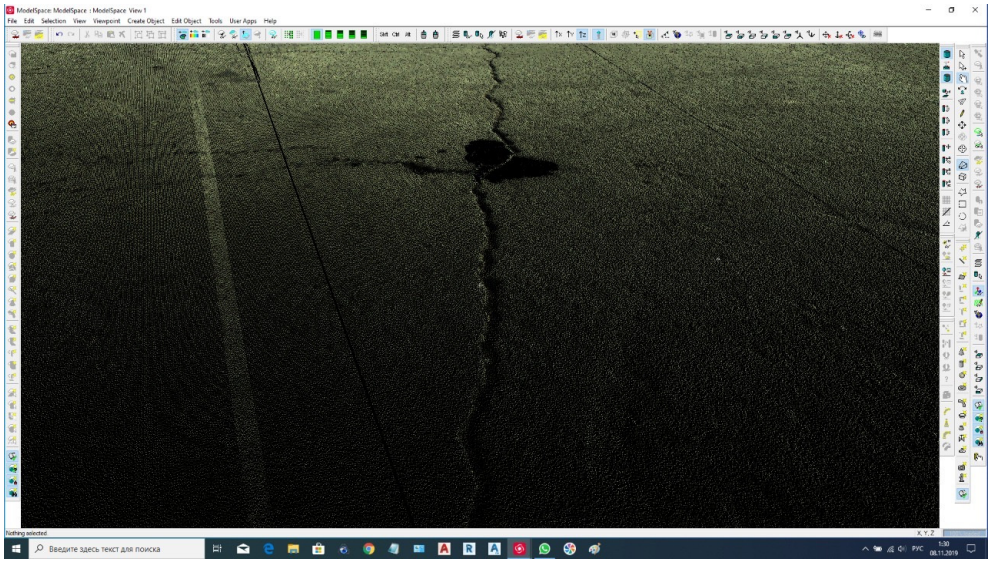


Рис. 2. Трещина в асфальтобетонном покрытии парковки под Тургеневским мостом

Рассматривая мониторинг под призмой системного анализа, можно выделить основные блоки всей процедуры, что позволит наиболее грамотно подойти к решению проблемы его совершенствования.

Пути автоматизации процесса обработки полученных данных в системе мониторинга

Основной проблемой, которая имеется на данный момент при таком способе мониторинга, является то, что камеральная часть работ по обработке первичной информации и составлению моделей объектов, также как и при применении традиционных методов, делается вручную. Это имеет ряд недостатков, основными из которых являются: зависимость времени исследования

от объема полученных данных, влияние человеческого фактора на точность и достоверность конечных результатов. В некоторых случаях влияние этих обстоятельств может привести к возникновению аварийных ситуаций на инфраструктурных объектах, нанося тем самым вред экономике отдельно взятого предприятия, целого города или всей страны, а иногда даже угрожая жизни людей. Поэтому задача обработки и классификации полученной информации в автоматическом режиме имеет особый интерес и апробируется в различных сферах изысканий, использующих системы лазерного сканирования [4–7].

Для поиска путей автоматизации процесса камеральной обработки данных и модернизации процедуры в целом в данном исследовании была составлена схема разрабатываемой системы мониторинга. Ее общая структура и функции представлены на рис. 3.

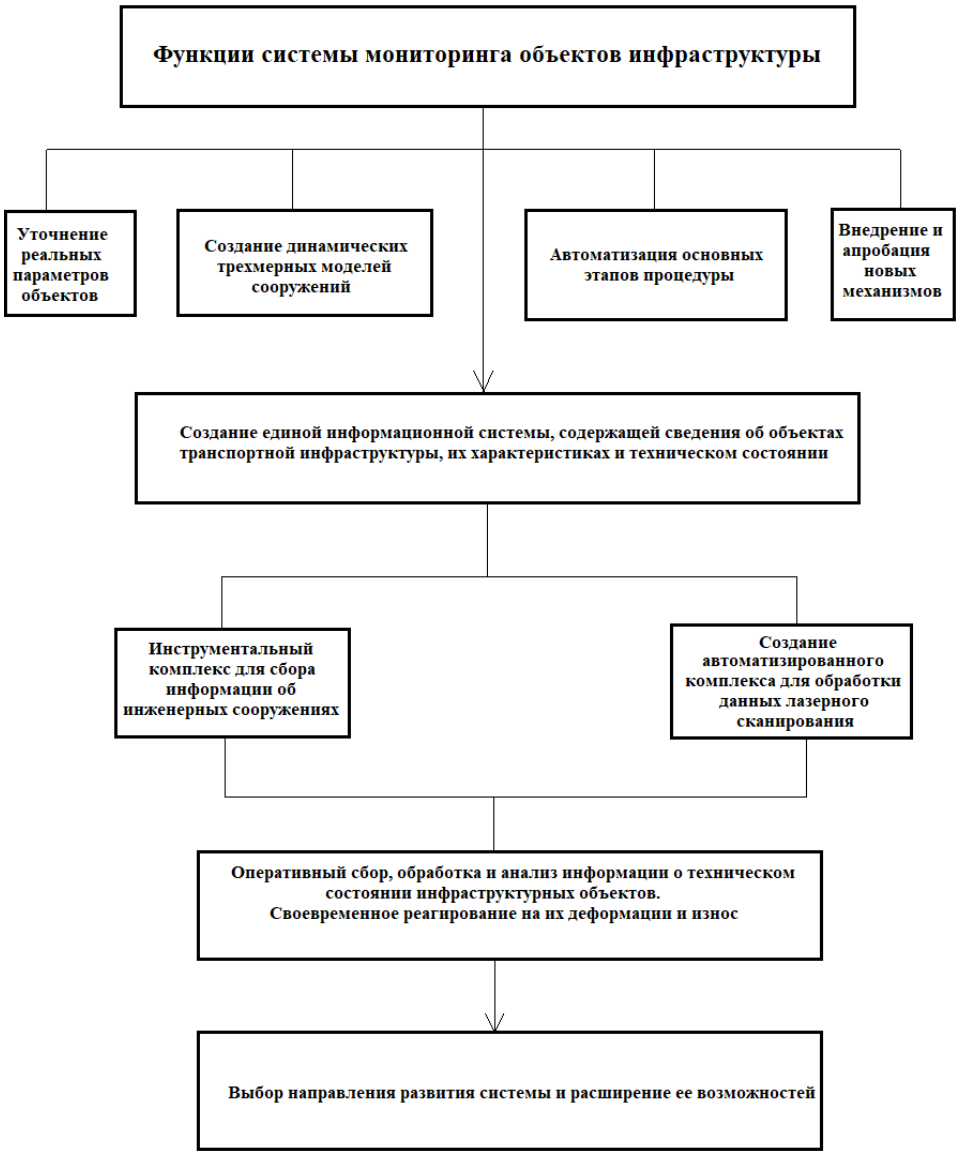


Рис. 3. Структура и функции системы мониторинга объектов инфраструктуры

В одном из предыдущих исследований по данной тематике научным коллективом был проведен анализ методов полуавтоматической обработки первичной информации [4]. В результате проведенной работы был сделан вывод о необходимости создания унифицированного и более совершенного программного обеспечения, которое сможет удовлетворять современным запросам обработки результатов лазерного сканирования.

Концепция интеллектуальной подсистемы в системе мониторинга

Одним из возможных вариантов таких программ могут стать решения на основе нейронных сетей, поскольку возможность обучения алгоритмов искусственного интеллекта позволит регулярно модернизировать и обновлять данный софт, делая его универсальным почти для любых нужд. Кроме того, это позволит использовать его и при других способах исследования состояния сооружений [7–9]. Поэтому следующим этапом развития такой системы станет создание софта, основными задачами которого являются:

1) автоматизированная обработка данных лазерного сканирования и создание трехмерных моделей объектов;

2) поиск деформированных элементов инженерных сооружений и определение масштабов повреждений.

В рамках разрабатываемой системы мониторинга наиболее рациональным решением будет разбиение интеллектуального блока мониторинга на две составляющие: автоматизированный комплекс по обработке данных лазерного сканирования и построению трехмерных моделей (рис. 4) и интеллектуальная подсистема определения изменения положения элементов сооружения в пространстве. Это позволит использовать потенциал системы не только для целей предупреждения аварийных ситуаций, но и для автоматического построения трехмерных моделей. В процессе создания компонентов системы предполагается взять за основу патенты, ранее разработанные одним из участников коллектива [10, 11].

Рис. 4. Структура комплекса по созданию трехмерных моделей

Для обработки полученной первичной информации и построения трехмерных моделей на вход подсистемы моделирования подаются данные форматов «E57», «Las», «Xyz», «Dxf», получаемые с лазерных сканеров. Далее происходит сшивка множества облаков точек в единое по общим точкам одного элемента на разных сканах. Заключающим этапом является математическое моделирование примитивов и создание трехмерной модели. В процессе разработки интеллектуальной подсистемы по поиску деформированных элементов инженерных сооружений планируется использовать компоненты системы определения геометрических параметров трехмерных объектов [10].

В соответствии с поставленными задачами в создаваемую подсистему войдут следующие блоки:

1. Блок построения трехмерной модели мостового сооружения ($b1$).
2. База данных о трехмерных моделях объекта ($b2$).
3. Блок сегментации трехмерной модели на конструктивные элементы ($b3$).
4. Блок сравнительного анализа деформационных изменений отдельных элементов ($b4$).
5. База данных о трехмерных моделях объекта с учтенными деформациями ($b5$).
6. Блок определения масштабов деформации ($b6$).

Схема взаимодействия вышеописанных блоков, данные на входе и на выходе каждого элемента, а также управляющие воздействия и механизмы обработки информации указаны на рис. 5.

Подсистема мониторинга мостовых сооружений (P) будет находиться в состояниях:

$$P = (S, G, F), \tag{1}$$

где $S(b1)$ – начальное состояние: импорт данных сканирования в форматах «E57», «Las», «Xyz», «Dxf»; $G(b1, b3, b4, b5)$ – промежуточное состояние: сшивка облаков точек и построение трехмерной модели мостового сооружения, ее последующая сегментация и выделение деформаций; $F(b2, b6)$ – конечное состояние: готовая трехмерная модель объекта, выявленные деформации моста в виде графического выделениях их площадей в формате 3D.

Заключение

В статье рассмотрены особенности и проблемы процедуры мониторинга мостовых сооружений. Отмечается, что использование технологии лазерного сканирования для этих целей позволяет получать информацию об их техническом состоянии в динамике, что дает возможность построения прогнозов по сроку их нормальной эксплуатации и отслеживания развития негативных деформационных процессов. Однако для создания единой системы по наблюдению за состоянием инженерных объектов необходимо также разработать эффективные инструменты по обработке получаемых данных.

Решением этой проблемы может стать интеллектуальный блок мониторинга, который позволит обрабатывать информацию, получаемую с лазерных сканеров, автоматически строить трехмерные модели сооружений и проводить анализ изменений положения конструктивных элементов сооружений в пространстве с течением времени, что является очень важным критерием при построении прогнозов остаточного срока службы объекта и рекомендаций по проведению ремонтных работ.

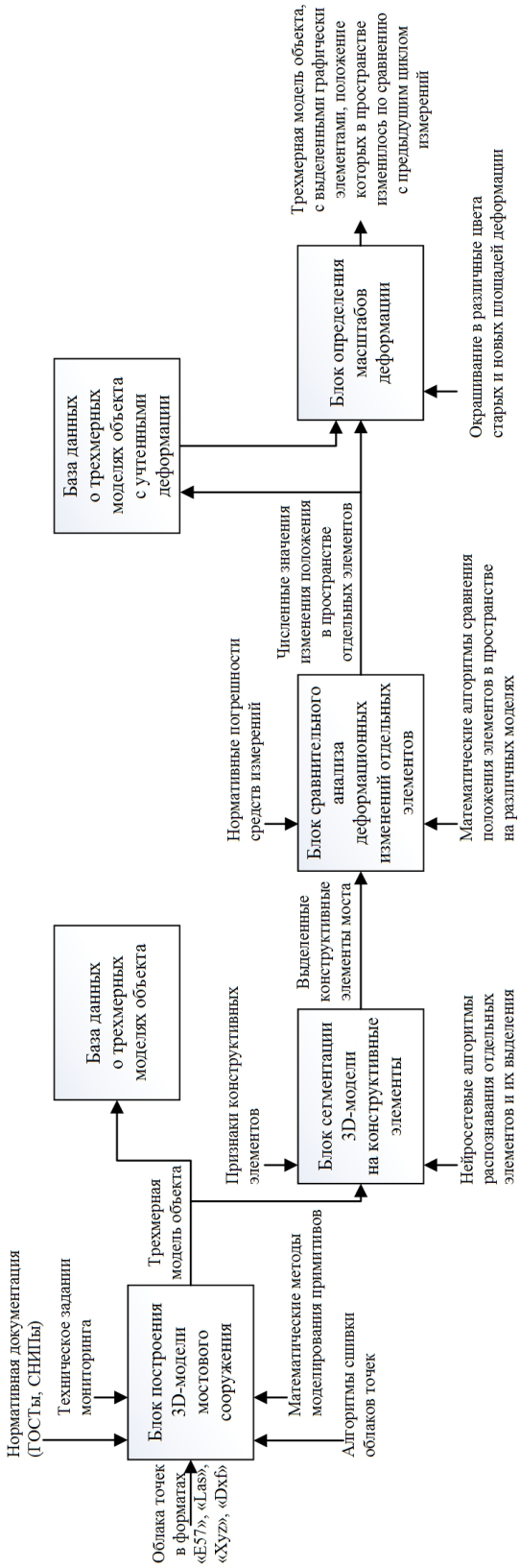


Рис. 5. Блок-схема работы и взаимодействия элементов интеллектуальной подсистемы мониторинга мостов

Создание подобного автоматизированного узла обработки и системы мониторинга в целом даст большой толчок развитию данной сферы изысканий. Использование средств системного анализа представляются коллективу наиболее перспективным и рациональным решением выявленной проблемы при достижении поставленной цели.

Библиографический список

1. **Желтко, А. Ч.** Разработка и исследование методов определений осадок, смещений и деформаций элементов автомобильных мостов : дис. … канд. техн. наук / Желтко А. Ч. – Ростов-на-Дону, 2017. – 135 с.
2. **Sánchez Rodríguez, A.** Long-term Performance and Durability of Masonry Structures / A. Sánchez Rodríguez, B. Riveiro Rodríguez, M. Soilán Rodríguez, P. Arias Sánchez // Degradation Mechanisms, Health Monitoring and Service Life Design Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. – 2019. – P. 265–285.
3. **Гура, Д. А.** Использование квадрокоптеров в цифровых изысканиях / Д. А. Гура, И. Г. Марковский // Современные проблемы земельно-кадастровой деятельности, урбанизации и формирования комфортной городской среды. – Тюмень, 2019. – С. 176–180.
4. Classification and Automatisation of Laser Reflection Points Processing in the Detection of Vegetation / D. A. Gura, M. V. Kuziakina, Yu. V. Dubenko, S. K. Pshidatok, G. G. Shevchenko, N. V. Granik, I. G. Markovskii // Proceedings of the international symposium "Engineering and earth sciences: applied and fundamental research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov. – 2019.
5. **Han, W.** Extraction of multilayer vegetation coverage using airborne LiDAR discrete points with intensity information in urban areas: A case study in Nanjing City, China / W. Han, S. Zhao, X. Feng, L. Chen // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. – № 30. – P. 56–64.
6. **Ma, H.** DEM refinement by low vegetation removal based on the combination of full waveform data and progressive TIN densification / H. Ma, W. I. Zhou, L. Zhang // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2018. – № 146. – P. 260–271.
7. **Liu, L.** A voxel-based multiscale morphological airborne lidar filtering algorithm for digital elevation models for forest regions / L. Liu, S. Lim // Measurement. – 2018. – № 123. – P. 135–144
8. **Целых, Д. С.** Устройства для анализа и оценки состояния дорожного покрытия / Д. С. Целых, О. О. Привалов // Технические науки: теория и практика : материалы Междунар. науч. конф. (г. Чита, апрель 2012 г.). – Чита : Молодой ученый, 2012. – С. 74–78.
9. Мониторинг сложных объектов инфраструктуры / Д. А. Гура, Ю. В. Дубенко, П. Ю. Бучацкий, И. Г. Марковский, Н. И. Хушт // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. 4, Естественно-математические и технические науки. – 2019. – № 4. – С. 74–80.
10. Патент 2650857 Российская Федерация. Система определения геометрических параметров трехмерных объектов / Дубенко Ю. В., Тимченко Н. Н. ; ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет. – № 2017111746 ; заявл. 06.04.2017 ; опубл. 17.04.2018.
11. Патент 2016615673 Российская Федерация. Программа для проектирования аналитических блоков и блоков принятия решений на основе искусственных нейронных сетей / Тимченко Н. Н., Дубенко Ю. В. ; ФГБОУ ВО Кубанский государственный технологический университет. – № 2016612682 ; заявл. 28.03.2016 ; опубл. 20.06.2016.

References

1. Zheltko A. Ch. *Razrabotka i issledovanie metodov opredeleniy osadok, smeshcheniy i deformatsiy elementov avtomobil'nykh mostov: dis. kand. tekhn. nauk* [Development and research of methods for determination of settlements, displacements and deformations of elements of automobile bridges: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Rostov-on-Don, 2017, 135 p. [In Russian]
2. Sánchez Rodríguez A., Riveiro Rodríguez B., Soilán Rodríguez M., Arias Sánchez P. *Degradation Mechanisms, Health Monitoring and Service Life Design Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2019, pp. 265–285.
3. Gura D. A., Markovskiy I. G. *Sovremennye problemy zemel'no-kadastrovoy deyatel'nosti, urbanizatsii i formirovaniya komfortnoy gorodskoy sredy* [Modern problems of land cadastral activities, urbanization and the formation of a comfortable urban environment]. Tyumen, 2019, pp. 176–180. [In Russian]
4. Gura D. A., Kuziakina M. V., Dubenko Yu. V., Pshidatok S. K., Shevchenko G. G., Granik N. V., Markovskii I. G. *Proceedings of the international symposium "Engineering and earth sciences: applied and fundamental research" dedi-cated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov*. 2019.
5. Han W., Zhao S., Feng X., Chen L. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014, no. 30, pp. 56–64.
6. Ma H., Zhou W. I., Zhang L. *IS-PRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018, no. 146, pp. 260–271.
7. Liu L., Lim S. *Measurement*. 2018, no. 123, pp. 135–144
8. Tselykh D. S., Privalov O. O. *Tekhnicheskie nauki: teoriya i praktika: materialy Mezhdunar. nauch. konf. (g. Chita, aprel' 2012 g.)* [Engineering sciences: theory and practice: proceedings of the International scientific conference (Chita, April, 2012]. Chita: Molodoy uchenyy, 2012, pp. 74–78. [In Russian]
9. Gura D. A., Dubenko Yu. V., Buchatskiy P. Yu., Markovskiy I. G., Khusht N. I. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 4, Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Adygei State University. Series 4, Natural and mathematical sciences]. 2019, no. 4, pp. 74–80. [In Russian]
10. Patent 2650857 Russian Federation. *Sistema opredeleniya geometricheskikh parametrov trekhmernykh ob"ektov* [System for determining the geometric parameters of three-dimensional objects]. Dubenko Yu. V., Timchenko N. N.; Kuban State Technological University. No. 2017111746; appl. 06.04.2017; publ. 17.04.2018. [In Russian]
11. Patent 2016615673 Russian Federation. *Programma dlya proektirovaniya analiticheskikh blokov i blokov prinyatiya resheniy na osnove iskusstvennykh neyronnykh setey* [A program for the design of analytical blocks and decision-making blocks based on artificial neural networks]. Timchenko N. N., Dubenko Yu. V.; Kuban State Technological University. No. 2016612682; appl. 28.03.2016; publ. 20.06.2016. [In Russian]

Гура Дмитрий Андреевич
кандидат технических наук, доцент, кафедра кадастра и геоинженерии, Институт строительства и транспортной инфраструктуры, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

Gura Dmitriy Andreevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of cadastre and geoengineering, Institute of Construction and Transport Infrastructure, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

E-mail: gda-kuban@mail.ru

Дубенко Юрий Владимирович
кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики и вычислительной техники, Институт компьютерных систем и информационной безопасности, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: scorpioncool1@yandex.ru

Dubenko Yuriy Vladimirovich
Candidate of engineering sciences, associate professor , sub-department of informatics and computer engineering, Institute of Computer Systems and Information Security, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

Марковский Иван Геннадьевич
студент, Институт строительства и транспортной инфраструктуры, Кубанский государственный технологический университет (Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2)

E-mail: Mr.djoker_o@mail.ru

Markovskiy Ivan Gennad'evich
Student, Institute of Construction and Transport Infrastructure, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya street, Krasnodar, Russia)

Образец цитирования:

Гура, Д. А. Разработка концепции интеллектуального блока обработки данных в системе мониторинга мостов с применением сканирующих технологий / Д. А. Гура, Ю. В. Дубенко, И. Г. Марковский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 14–24. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-2.

УДК 004.3.02:004.085.3:004.074
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-3

А. В. Чернышов

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ НА ОПТИЧЕСКИХ ДИСКАХ, ОБЪЕДИНЕННЫХ В ГИБРИДНЫЕ СТРУКТУРЫ

Аннотация.

Актуальность и цели. Одной из задач проектирования долговременных электронных хранилищ является минимизация количества носителей информации при достижении максимально возможной надежности хранения информации. При использовании в качестве носителей оптических дисков эта задача может быть решена объединением носителей в структуры RAID. Однако при этом для архивов, не использующих дорогостоящие роботизированные библиотеки, возникает проблема оперативного доступа к хранимой информации. Проблема может быть решена объединением носителей в гибридные структуры, где наряду с массивами RAID информация хранится также и на одинарных носителях. Целью исследования является построение математической модели надежности хранения информации на оптических дисках, объединенных в гибридные структуры (названы в работе как G5, G6, G15, G16), и определение с помощью этой модели наиболее выгодной структуры.

Материалы и методы. Построение модели базируется на известных методах оценки надежности массивов RAID, разработанных для жестких дисков, которые были дополнены выражениями для учета надежности хранения информации на группах одиночных дисков. В качестве исходных данных для модели рассматриваются: общий объем архивного хранилища, емкость одного оптического диска, вероятность выхода из строя оптического диска при хранении между проверками целостности, условное количество дисков с информацией в массиве RAID, количество изготавливаемых запасных копий.

Результаты. Построена модель и проведено моделирование для различных значений емкости электронного архива. Для сравнения выполнено также моделирование для архивов на базе RAID наиболее распространенных типов (5, 6, 15, 16), а также для архива на базе одиночных дисков с запасными копиями. Подтверждено, что хотя гибридные структуры и проигрывают по надежности «чистым» RAID, но значительно превосходят архивы на одиночных дисках.

Выводы. По результатам исследования для создания архивов на оптических дисках, объединенных в гибридные структуры, можно однозначно рекомендовать структуру G16.

Ключевые слова: долговременное электронное хранилище информации, гибридные структуры оптических дисков, надежность хранения информации

A. V. Chernyshov

MODEL OF RELIABILITY OF LONG-TERM STORAGE OF INFORMATION ON OPTICAL DISKS UNITED IN HYBRID STRUCTURES

© Чернышов А. В., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. One of the tasks of designing long-term electronic storage is to minimize the number of data carriers while achieving the maximum possible reliability of information storage. When using optical disks as media, this problem can be solved by combining the media into RAID structures. However, for archives that do not use expensive robotic libraries, there is a problem of rapid access to stored information. The problem can be solved by combining media in hybrid structures, where along with RAID arrays; information is also stored on single media. The aim of the study is to build a mathematical model of the reliability of information storage on optical disks combined in hybrid structures (named in the paper as G5, G6, G15, G16), and determine the most profitable structure using this model.

Materials and methods. The model is based on well-known methods for evaluating the reliability of RAID arrays developed for hard disks, which were supplemented with expressions to account for the reliability of storing information on groups of single disks. The initial data for the model is considered: the total volume of archive storage, the capacity of a single optical disk, the probability of failure of the optical disk during storage between integrity checks, the conditional number of disks with information in the RAID array, and the number of spare copies being made.

Results. A model is constructed and simulations are performed for various values of the capacity of the electronic archive. For comparison, we also performed simulations for RAID-based archives of the most common types (5, 6, 15, 16), as well as for an archive based on single disks with spare copies. It is confirmed that although hybrid structures are less reliable than "pure" RAID, they are significantly superior to archives on single disks.

Conclusions. According to the results of the study, we can definitely recommend the G16 structure for creating archives on optical disks combined in hybrid structures.

Keywords: long-term storage of electronic information, hybrid structures of optical discs, reliability of information storage

Введение

При проектировании архивных хранилищ электронной информации, призванных обеспечить сохранность информации в течение десятилетий, всегда встает вопрос об обеспечении надежности хранения информации с одновременным обеспечением доступности информации потенциальным потребителям. Одной из проблем здесь является естественная деградация с течением времени применяемых для хранения носителей информации. Существующие методические рекомендации, посвященные вопросам оцифровки «бумажных» документов и обеспечению надежности сохранения полученных электронных копий [1, 2], как правило, много внимания уделяют довольно сложному порядку обеспечения доступа потребителей к информации через использование дубликатов носителей, но при этом почти ничего не говорят о способах организации надежного хранения оригинальных носителей с архивной информацией, ограничиваясь общими рекомендациями о необходимости использовать надежные технические решения начиная от систем хранения данных (СХД) и заканчивая съемными носителями с необходимым количеством копий.

Между тем действующий стандарт [3] прямо указывает, что для хранения электронной информации в долговременных архивах должны использо-

ваться носители типа WORM, что на сегодня однозначно указывает на оптические носители однократной записи, т.е. носители типов: CD-R, DVD+/-R, BD-R и им подобные.

Как показывают исследования, для хранилищ большого объема типа СХД даже для информации, имеющей статус оперативной, большая часть информации запрашивается редко, а часть информации – вообще никогда [4]. Запросы на доступ к информации, находящейся в долговременном архиве, как правило, поступают редко. Поэтому хранение архивной информации на съемных носителях, к числу которых относятся и оптические диски однократной записи, является технически и экономически оправданным решением.

Как правило, информация записывается на одиночные архивные носители, с которых делаются дубликаты для предоставления информации пользователям. При этом архивные носители для обеспечения необходимой надежности хранения информации сразу записывают в виде нескольких запасных копий. Если обозначить через n количество необходимых запасных копий, то можно считать, что носители информации в архиве образуют структуры типа n-кратных RAID10 (хотя, в отличие от объединяемых в RAID10 жестких дисков в СХД, они продолжают использоваться только поодиночке). В дальнейшем будем обозначать эту структуру как R1.

В развитие этой идеи в работах [5, 6] было показано, что объединение архивных носителей информации в n-кратные структуры типа RAID5, RAID6, RAID15, RAID16 (обозначим их как R5, R6, R15, R16) способно при сохранении сопоставимого уровня надежности хранения информации уменьшить количество носителей в архиве по сравнению с n-кратными структурами R1. Такой подход, кроме экономии средств на приобретение носителей, должен обеспечить экономию пространства для хранения носителей, а заодно и экономию времени на регулярный контроль целостности информации, хранимой на носителях, что в свою очередь позволяет увеличить емкость архива.

Проблема, однако, заключается в том, что съемные носители, составляющие структуры типа R5, R6, R15, R16, при воспроизведении информации должны быть реально объединены в RAID. Это не составляет большой проблемы при использовании дорогостоящих роботизированных библиотек типа [7], но во многих других случаях, когда, прежде всего по экономическим соображениям, дорогостоящее оборудование применено быть не может, время доступа к архивной информации может существенно возрасти.

Например, несложно представить себе архив небольшой организации с одним сервером и одним пишущим/воспроизводящим приводом. Информация к записи на съемные носители накапливается на жестком диске сервера. При этом на жестком диске выделены файлы с образами для записи съемных носителей, эти файлы логически объединены в структуру RAID, на которую и выполняется запись информации, помещаемой в архив. Как только очередная структура RAID будет заполнена информацией, каждый из файлов образов последовательно (с применением одного пишущего привода) записывается на n съемных носителей, что и обеспечивает формирование в архиве соответствующих структур RAID из съемных носителей.

Однако теперь при необходимости воспроизведения архивной информации необходимо выполнить обратный перенос на диск сервера полного

объема одного из массивов RAID в виде файлов образов и только после этого RAID может быть логически собран, обеспечив доступ к информации.

Описанная проблема может быть решена, если из n запасных копий в архиве только (n – 1) будут представлять собой структуры RAID, а одна копия будет записана на одиночных носителях. Назовем такие структуры гибридными. Такие структуры могут быть созданы на базе любой из структур типа R5, R6, R15, R16. Обозначим их, соответственно, как G5, G6, G15, G16.

Долговременные архивы, выполненные на съемных носителях, объединенных в гибридные структуры, ранее в литературе не рассматривались. Для проектирования и последующей эксплуатации таких архивов необходимо построить модель, позволяющую оценить надежность хранения информации в зависимости от ряда факторов, включая количество запасных копий n.

1. Материал и методика

Для построения модели зададимся следующими параметрами: W – общий объем создаваемого архивного хранилища; V – емкость одного съемного носителя информации.

Информация будет записываться в архив блоками, определяемыми размером RAID применяемого типа.

Отталкиваясь от моделей, применяемых для рассмотрения массивов RAID, построенных на жестких дисках [8–10], опишем их в общем виде. Пусть k – условное количество носителей с хранимой информацией ($k > 1$), m – условное количество носителей с контрольной информацией, тогда

$$k^* = k + m,\ k > 1,\ m = 1 \text{ для R5 и R15},\ m = 2 \text{ для R6 и R16}.$$

Обозначим n – количество запасных копий информации, q – вероятность выхода из строя одного носителя информации за период между последовательными контролями исправности (обычно 1 год), L – количество блоков, которые будет содержать архив ($L = (l / k)$, где $l = (W / V)$).

Для структур типа G5, G6 имеем следующие соображения.

В блоке имеется k одиночных дисков с информацией, причем на каждом диске информация уникальна. Информация будет хотя бы частично потеряна, если будет испорчен хотя бы один диск. Следовательно, вероятность потери информации будет оценена как

$$Q_{\text{од}} = 1 - (1 - q)^k .$$

В блоке также имеется несколько массивов R5 или R6, дублирующих информацию одиночных дисков в (n – 1) копий. Вероятность потери информации на одном массиве запишется как

$$Q_R = 1 - \sum_{i=0}^{m} \left(q^i (1-q)^{k-i} C_k^i \right) = \sum_{i=m+1}^{k} \left(q^i (1-q)^{k-i} C_k^i \right),$$

где $C_k^i = \dfrac{k!}{i!(k-i)!}$.

Таким образом, вероятность потери информации в одном блоке можно оценить как $Q_{\text{од}}Q_R^{n-1}$, а в L блоках соответственно

$$Q = 1 - \left(1 - Q_{\text{од}}Q_R^{n-1}\right)^L.$$

Для структур типа G15, G16 для одного блока значение $Q_{\text{од}}$ не изменится, а вероятность потери информации на массивах R15, R16 в одном блоке для (n – 1) копии составит

$$Q_{R1} = 1 - \sum_{i=0}^{m}\left(\left(q^{n-1}\right)^i\left(1 - q^{n-1}\right)^{k-i}C_k^i\right).$$

Для всего архива вероятность потери информации составит

$$Q = 1 - \left(1 - Q_{\text{од}}Q_{R1}^{n-1}\right)^L.$$

Модель построена.

2. Результаты

Для построенных моделей было проведено численное моделирование для архивов различной емкости W в пределах от 1 до 90 Тбайт. Моделирование выполнялось для архивов на оптических дисках емкостью $V = 25$ Гбайт (BD-R). Использовалось наиболее вероятное значение вероятности выхода диска из строя $q = 0{,}1$ [11]. Расчеты были выполнены для наиболее надежных (и, соответственно, наиболее избыточных) массивов RAID при $k = 2$.

На рис. 1 показаны графики зависимости вероятности потери информации в архиве Q от объема архива W для количества копий информации n, при котором $Q < 0{,}0001$ (разработчик архива может рассмотреть и другие значения Q). Видно, что вне зависимости от объема архива соотношение значений Q для разных структур архива остается практически постоянным. Следовательно, для определения наиболее выгодной структуры с точки зрения количества запасных копий n в большинстве случаев достаточно рассмотреть архив любой фиксированной емкости.

В табл. 1 приведены расчетные данные (количество носителей) / (количество копий) для $W = 10$ Тбайт.

3. Обсуждение

Прежде всего необходимо заметить, что, хотя выкладки для структур G5, G6 и были сделаны, на практике нет большого смысла в их применении. Гибридные структуры являются компромиссом между скоростью доступа к информации и надежностью хранения, применяемым при невозможности использования дорогостоящих роботизированных библиотек. В этом случае все манипуляции с архивными носителями выполняются вручную, что позволяет с одинаковым успехом реализовать как структуры G5, G6, так и структуры G15, G16, но последние имеют значительно более высокую надежность хранения.

По значениям в табл. 1 можно видеть, что для достижения сопоставимой надежности хранения информации гибридным структурам требуется не-

много больше запасных копий, чем «чистым» RAID. Однако это количество копий все равно существенно меньше, чем для структуры R1.

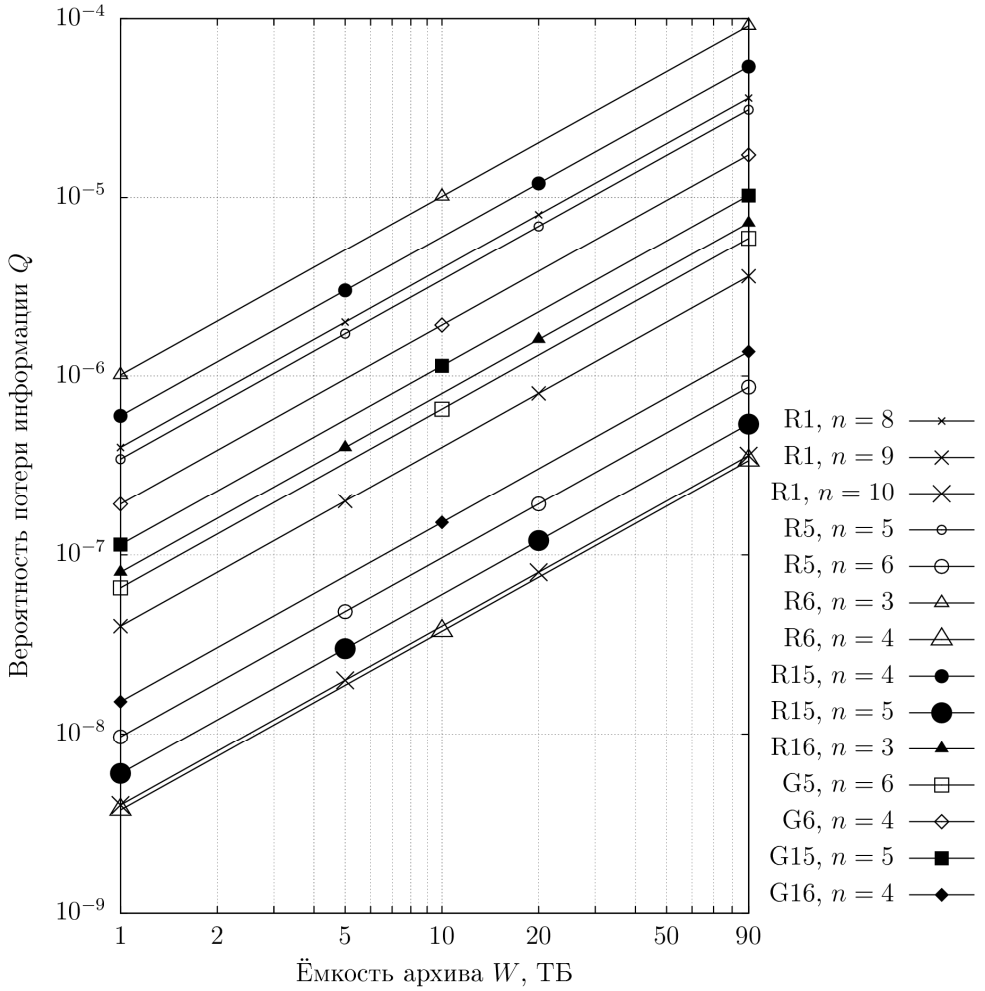


Рис. 1. Зависимость вероятности потери информации от емкости архива для различных структур, в которые организованы носители информации

Среди всех гибридных структур оптимальной с точки зрения максимальной надежности хранения информации при минимальном количестве носителей является структура G16.

Заключение

В статье построена модель надежности хранения информации в долговременных электронных архивах, реализованных на оптических дисках, объединенных в гибридные структуры.

Показано, что с практической точки зрения представляют интерес только гибридные структуры типа G15, G16.

Проведено численное моделирование и на основе полученных результатов сделан вывод, что наиболее предпочтительной для применения в электронных архивах является структура типа G16.

Таблица 1

Тип структуры	Количество дисков / количество копий информации												
	хуже ← Q → лучше												
R1			3200/8						3600/9				
R5				3000/5							3600/6		
R15		2400/4										3000/5	
R6	2400/3												3200/4
R16							2400/3						
G5								3400/6					
G15						2800/5							
G6					2800/4								
G16										2800/4			

Библиографический список

1. **Юмашева, Ю. Ю.** Методические рекомендации по электронному копированию архивных документов и управлению полученным информационным массивом / Ю. Ю. Юмашева. – Москва : Росархив, ВНИИДАД, 2012. – 125 с.
2. Рекомендации по комплектованию, учету и организации хранения электронных архивных документов в государственных и муниципальных архивах. – Москва : Федеральное архивное агентство. ВНИИДАД, 2013. – 49 с.
3. ГОСТ Р 54989–2012 / ISO TR 18492:2005. Обеспечение долговременной сохранности электронных документов. – Москва, 2013.
4. **Корепанов, И.** Как сохранить архив на десятилетия? / И. Корепанов // Журнал сетевых решений/LAN. – 2008. – № 03. – URL: http://www.osp.ru/lan/2008/03/4899898/ (дата обращения: 04.11.2015).
5. **Чернышов, А. В.** Метод повышения надежности хранения информации в долговременных электронных хранилищах на оптических дисках, организованных в массивы RAID-6, за счет смешивания дисков запасных копий / А. В. Чернышов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2017. – № 4. – С. 88–97. – DOI 10.18698/0236-3933-2017-4-88-97.
6. **Чернышов, А. В.** Исследование свойств долговременных электронных архивных хранилищ информации на оптических дисках, организованных в структуры RAID-5 / А. В. Чернышов // Информационные технологии. – 2018. – Т. 24, № 9. – С. 586–593. – DOI 10.17587/it.24.586-593.
7. Data Archiver LB-DH8 series. – URL: http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/ (дата обращения: 01.02.2016).
8. **Thomasian, A.** Hierarchical RAID: Design, performance, reliability, and recovery / A. Thomasian, Y. Tang, Y. Hu // J. Parallel Distrib. Comput. – 2012. – Vol. 72. – P. 1753–1769. – DOI 10.1016/j.jpdc.2012.07.002
9. **Thomasian, A.** Shortcut method for reliability comparisons in RAID / A. Thomasian // Journal of Systems and Software. – 2006. – Vol. 79. – P. 1599–1605.
10. **Yuan, D.** A Randomly Expandable Method For Data Layout Of Raid Storage Systems / D. Yuan, X. Peng, T. Liu, Z. Cui // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2018. – Vol. 14, № 3. – P. 1079–1094.
11. **Чернышов, А. В.** Определение значения вероятности выхода из строя однократно записываемого оптического диска с записью в процессе хранения в долговременном архиве / А. В. Чернышов // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23, № 4. – С. 82–87. – DOI 10.18698/2542-1468-2019-4-82-87

References

1. Yumasheva Yu. Yu. *Metodicheskie rekomendatsii po elektronnomu kopirova-niyu arkhivnykh dokumentov i upravleniyu poluchennym informatsionnym massivom* [Methodical recommendations for electronic copying of archival documents and management of the received information array]. Moscow: Rosarkhiv, VNIIDAD, 2012, 125 p. [In Russian]
2. *Rekomendatsii po komplektovaniyu, uchetu i organizatsii khraneniya elektronnykh arkhivnykh dokumentov v gosudarstvennykh i munitsipal'nykh arkhivakh* [Recommendations for the acquisition, accounting and storage of electronic archival documents in state and municipal archives]. Moscow: Federal'noe arkhivnoe agentstvo. VNIIDAD, 2013, 49 p. [In Russian]
3. GOST R 54989–2012 / ISO TR 18492:2005. *Obespechenie dolgovremennoy sokhrannosti elektronnykh dokumentov* [Ensuring long-term preservation of electronic documents]. Moscow, 2013. [In Russian]

4. Korepanov I. *Zhurnal setevykh resheniy/LAN* [Network Solutions Journal/LAN]. 2008, no. 03. Available at: http://www.osp.ru/lan/2008/03/4899898/ (accessed 04.11.2015). [In Russian]
5. Chernyshov A. V. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Priborostroenie* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrument engineering]. 2017, no. 4, pp. 88–97. DOI 10.18698/0236-3933-2017-4-88-97. [In Russian]
6. Chernyshov A. V. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology]. 2018, vol. 24, no. 9, pp. 586–593. DOI: 10.17587/it.24.586-593. [In Russian]
7. *Data Archiver LB-DH8 series*. Available at: http://panasonic.net/avc/archiver/lb-dh8/ (accessed 01.02.2016).
8. Thomasian A., Tang Y., Hu Y. *J. Parallel Distrib. Comput*. 2012, vol. 72, pp. 1753–1769. DOI 10.1016/j.jpdc.2012.07.002
9. Thomasian A. *Journal of Systems and Software*. 2006, vol. 79, pp. 1599–1605.
10. Yuan D. A, Peng X., Liu T., Cui Z. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2018, vol. 14, no. 3, pp. 1079–1094.
11. Chernyshov A. V. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin]. 2019, vol. 23, no. 4, pp. 82–87. DOI 10.18698/2542-1468-2019-4-82-87 [In Russian]

Чернышов Александр Викторович
кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета) (Россия, Московская область, Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, 1)

E-mail: sch-ru@yandex.ru

Chernyshov Aleksandr Viktorovich
Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of applied mathematics, computer science and engineering, Mytischi Branch of Bauman Moscow State Technical University (National Research University) (1 1st Institutskaya street, Mytischi-5, Moscow region, Russia)

Образец цитирования:

Чернышов, А. В. Модель надежности долговременного хранения информации на оптических дисках, объединенных в гибридные структуры / А. В. Чернышов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 25–33. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-3.

УДК 004.02:622.22
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-4

Д. Р. Подрезов

АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БЛОКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ НА ОСНОВЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Аннотация.

Актуальность и цели. Проведен комплексный анализ системных связей основных технико-технологических показателей функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана.

Материалы и методы. В основу проведенного исследования легла разработка информационной модели эксплуатации технологических скважин, позволившая определить взаимосвязи между основными объемными и качественными показателями отработки запасов на месторождении, такими как: объемы горнорудной массы, объемы вскрытых запасов, извлечение металла, средняя концентрация урана, величина рудного интервала

Результаты. Проведенный в рамках разработанной информационной модели анализ геологической и технологической информации, а также оценка эволюции запасов в процессе отработки блоков месторождения показали, что 76 % функционирующих технологических блоков на месторождении демонстрируют переизвлечение по фактическим показателям или ожидаемое в ближайшее время по прогнозным оценкам. Для адекватной оценки запасов технологических блоков осуществлено формирование исходного множества факторных признаков, определяющих объемы вскрытых запасов и объемы добычи на месторождении: интервал эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта, группировка технологических скважин блока, площадь технологического блока.

Выводы. Результаты пересчета запасов показали, что реальные запасы урана в недрах не соответствуют фактической отработке. Кроме того, было выявлено, что систематическая недооценка вскрытых запасов связана еще и с расчетом содержания урана в рудных интервалах, т.е. с принятым в расчет значением коэффициента радиоактивного равновесия.

Ключевые слова: факторные группировки, системные связи, эффективность функционирования, задача выбора, подсчет запасов.

D. R. Podrezov

ANALYSIS OF SYSTEM CONNECTIONS OF THE TECHNOLOGICAL UNIT FUNCTIONING INDICATORS AND SOLVING THE PROBLEM OF CHOOSING OPTIONS FOR RESERVE CALCULATION BASED ON GEOPHYSICAL DATA

© Подрезов Д. Р., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Abstract.

Background. The work carried out a comprehensive analysis system connection the main technical and technological parameters operation technological units of the underground well leaching mine uranium.

Materials and methods. The analysis was based on the development an information model technological wells operation, which allowed to determine the relationships between the main volume and quality development indicators of reserves at the field, such as: mining mass volumes; the opened stocks volumes; metal extraction; average uranium concentration; an ore interval size.

Results. The geological and technological information analysis carried out within the framework information model developed, as well as evolution assessment reserves during the development the field blocks showed that 76% the functioning technological blocks at the field show re-attraction by actual indicators or expected in the near future by forecast estimates. In order to adequately estimate the technological unit's reserves, the initial set factor features determining the opened reserves volumes and the production volumes at the field was formed: effective capacity interval acidified productive horizon; unit process wells grouping; the technological block area.

Conclusions. The inventory conversion results showed that the actual uranium reserves in the subsoil did not correspond to the actual development. In addition, it was found that the exposed reserves systematic underestimation was also related to the uranium content calculation in ore intervals, which is, to the radioactive equilibrium coefficient taken into account value.

Keywords: factor groupings, system communications, functioning efficiency, the choice problem, stocks calculation.

Введение

На сегодня на руднике подземного скважинного выщелачивания выявлено явное несоответствие между геологическими и вскрытыми запасами урана технологических блоков и объемами добычи. Имеются примеры как переоценки технологических запасов, так и наоборот. Предположительной причиной несоответствия вскрытых и геологических запасов урана является использование ошибочных поправочных коэффициентов при интерпретации данных геоинформационных систем [1, 2]. Такие несоответствия затрудняют прогноз геолого-технологических параметров, таких как: объем необходимого годового прироста вскрытых запасов, объемы необходимого бурения и ввода блоков в эксплуатацию, объемы расходов серной кислоты на закисление и последующее выщелачивание. Также имеет место дебаланс между объемами выщелачивающего и продуктивного растворов в масштабе технологического блока или его части отрицательно влияющий на интенсивность отработки балансовых запасов.

Для поиска путей преодоления вышеуказанных проблем в работе был проведен анализ системных связей показателей функционирования технологического блока. В его основе лежит информационная модель эксплуатации технологических скважин, под которой будем понимать модель, содержащую целенаправленно отобранную и представленную в формальном виде (таблицы, функции, зависимости, соотношения) существенную информацию в виде показателей, параметров и структуры взаимосвязей между ними, позволяющую численно описать и прогнозировать возможные состояния эксплуатации

технологических скважин рудника подземного скважинного выщелачивания урана [3, 4].

Материал и методы

На основе первичных данных гидрогеологической службой в компьютерном виде ведется оперативный поблочный учет объемов и качества растворов, учет добычи металла в блоках и поступления в блоки выщелачивающих реагентов и окислителей, а также осуществляется текущий контроль за соблюдением баланса объемов откачанных и закачанных растворов, составляются квартальные, годовые и сводные отчеты [5, 6]. На базе полученных сведений формируется перечень графической документации, содержащей информацию о гидрохимических условиях эксплуатации блока подземного выщелачивания, а именно: сводный хронологический график изменения качества и баланса растворов, который строится для каждого эксплуатационного блока в компьютерном варианте; карта пьезометрической поверхности участка; карта растекания растворов; схематический план концентрации металла блока; профили запескованности эксплуатационного блока [7].

Проведенный в рамках информационной модели эксплуатации технологических скважин анализ геологической и технологической информации показал, что на месторождении 76 % блоков на стадии отработки более 80 % от вскрытых запасов демонстрируют переизвлечение по фактическим показателям или ожидаемое в ближайшее время по прогнозным оценкам. Данные сведения убедительно свидетельствуют о наличии серьезной проблемы системной недооценки запасов технологических блоков на месторождении (рис. 1).

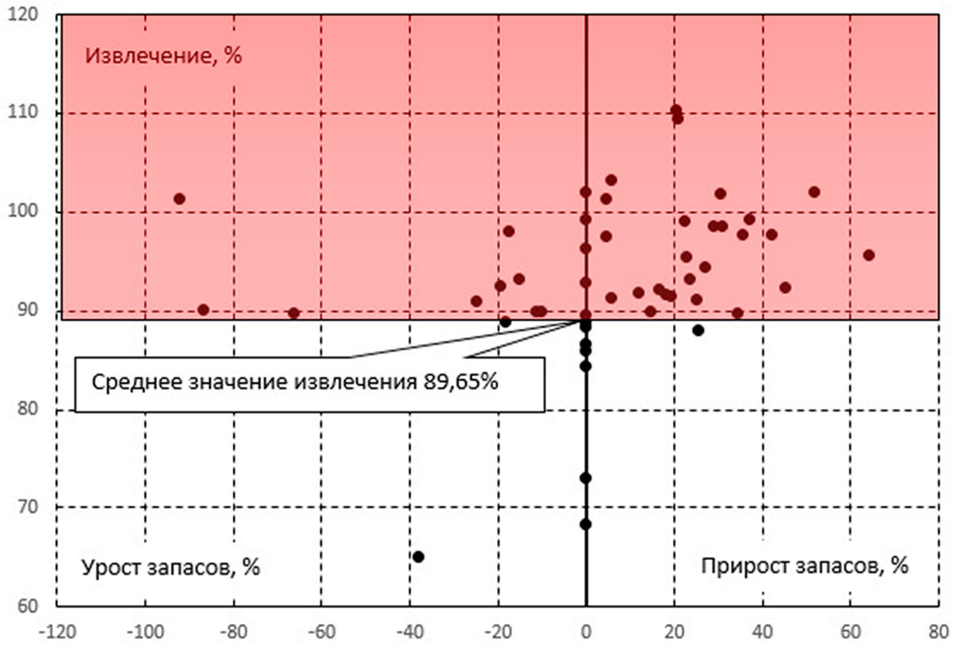


Рис. 1. Корректировка запасов и извлечения металла на технологических блоках месторождения

Для определения основных причин возникновения системной недооценки запасов была исследована структура основных показателей стохастической факторной системы геофизических данных, под которой будем понимать совокупность факторных (множество геофизических и технологических данных) и результативных (объем запасов технологического блока) признаков, связанных между собой причинно-следственной связью вида $Q_з = \xi(F1,F2,F3)$, определяющих объем вскрытых запасов на месторождении.

Факторная группа F1 представляет собой совокупность геофизических данных, которые характеризуют интервал эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта и используются для корректировки величины рудных интервалов, включаемых в подсчет запасов технологического блока.

Факторная группа F2 содержит показатели и условия группировки технологических скважин блока, которые базируются на выявлении законов распределений метропроцента рудных интервалов в разрезе и по площади.

В факторную группу F3 входят показатели, которые используются для коррекции контуров технологического блока, проведенных по проекциям фильтров граничных скважин для дальнейшего расчета его площади.

Учет показателей данных трех групп факторов позволил реализовать процедуру пересчета запасов технологического блока на базе оценки эффективной мощности закисляемого продуктивного горизонта, площади по проекциям фильтров и группировок сближенных скважин (табл. 1). В качестве системы ограничений при решении задачи выбора варианта подсчета запасов выступают условия переинтерпретации геофизических данных морфологических элементов рудной залежи (мешки/крылья) и корректировка границ рудного интервала для сложноструктурных элементов рудной залежи [8].

Таблица 1

Вариант подсчета запасов технологического блока
с учетом интервалов в эффективной мощности, площади
по проекциям фильтров и группировок сближенных скважин

Параметры технологического блока	Варианты подсчета запасов по годам		
	t_1	t_2	По факторной модели на момент времени t_2
Количество скважин в подсчете	71	71	**71 (базовый) (67 сгруппированных)**
Эффективная мощность закисляемого продуктивного горизонта ($M_э$, м)	14,2	14,2	**14**
Средняя рудная мощность (m, м)	9,09	9,09	**8,88**
Среднее содержание урана в руде (c, %)	0,104	0,108	**0,1002**
Средняя продуктивность рудного тела (m_U, кг/м^2)	16,45	17,08	**15,48**
Площадь блока ($S_{бл}$, тыс. м^2)	35100	35100	**33350**
Объем запасов ($Q_з$, т)	467	472	**516**

Очевидно, что при учете всех указанных выше факторных признаков и ограничений запасы блоков увеличиваются от последнего по времени учета t_2 на 9,3 %. Представленный выше подсчет запасов по предлагаемой факторной

модели показал, что реальные запасы урана в недрах не соответствуют фактической отработке. При этом систематическая недооценка вскрытых запасов связана еще и с расчетом содержания урана в рудных интервалах, т.е. с принятым в расчет значением коэффициента радиоактивного равновесия ($K_{рр}$).

В этой связи на следующем этапе исследования был проведен корреляционный анализ зависимости коэффициента радиоактивного равновесия от содержания радия (рис. 2) по различным морфологическим элементам залежи. Данный подход необходимо реализовать для теоретико-методологического и практического обоснования систематической неодооценки вскрытых запасов месторождения урана. Проведенные исследования позволили выявить значимые корреляционные зависимости коэффициента радиоактивного равновесия от средней массовой доли радия для месторождения урана с разделением по морфологическим элементам залежи и зависимости $K_{рр}$ от среднего значения мощности рудных интервалов для останцовой части залежи месторождения [9, 10].

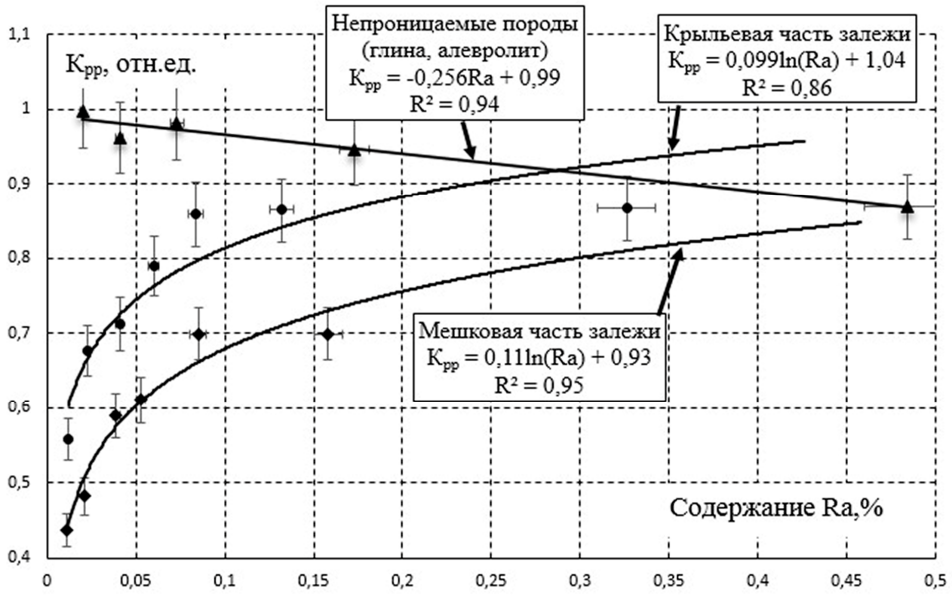


Рис. 2. Зависимости $K_{рр}$ от средней массовой доли радия для месторождения урана с разделением по морфологическим элементам залежи

Вышеизложенные представления позволяют предполагать, что в условиях рассматриваемого месторождения уран будет иметь не столь высокую корреляционную связь с радием, концентрируясь в передовых частях прямых мешков и в обратных мешках. Именно в таких формах будет наблюдаться минимальный $K_{рр}$ при высоком содержании урана. И эта же гипотеза позволяет предполагать, что на месторождении мы имеем дело с маломощными вторичными прямыми мешками, формируемыми по мощным крыльям, и с обширными обратными мешками в зонах ослабленной динамики голоценовых подземных вод. В этой связи возникает необходимость корректировки границ рудных интервалов по эффективной мощности.

На основе вышесказанного подсчитаем запасы технологического блока по сформированной совокупности вариантов расчетов (табл. 2).

Вариант 1. Подсчет запасов технологического блока с учетом интервалов в эффективной мощности, площади по проекциям фильтров и группировок сближенных скважин (факторная модель $Q_з = \xi(F1, F2)$.

Вариант 2. Пересчет рудных интервалов в соответствии с ограничением мощности и корректировками границ, а также подсчет запасов технологического блока с учетом интервалов в эффективной мощности, площади по проекциям фильтров и группировок сближенных скважин (факторная модель $Q_з = \xi(F1, F2, F3)$.

Вариант 3. Пересчет рудных интервалов в соответствии с ограничением мощности крыльев и корректировками границ, а также подсчет запасов технологического блока с учетом интервалов в эффективной мощности, площади по проекциям фильтров (факторная модель $Q_з = \xi(F1, F2, F3)$ с учетом переинтерпретации геофизических данных).

В этой связи в общем виде задачу выбора варианта учета различных факторных признаков для оценки запасов на месторождении можно сформулировать как многокритериальную. Разновидностью решения задачи выбора может выступать расчет соответствующих метрик. Так, в метрике R^2 определяется расстояние от центра (идеальной точки, имеющей наилучшие значения по множеству оценочных критериев) до всех остальных векторов (табл. 3). Для вектора x_j расстояние определяется по формуле

$$R_x^{(j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i^{(j)} - x_c)^2} \ .$$

Проведенные расчеты показали, что лучшие значения по оценке запасов исходя из функции ценности и R^2-метрики дает третий вариант.

Результаты и выводы

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить значимые корреляционные зависимости коэффициента радиоактивного равновесия ($K_{рр}$) от средней массовой доли радия с разделением по морфологическим элементам залежи (мешки/крылья/останцы).

При этом расчет запасов технологического блока рекомендовано проводить по сформированной совокупности вариантов, включающих подсчет запасов технологического блока с учетом рудных интервалов в эффективной мощности, площади по проекциям фильтров и группировок сближенных скважин; пересчет рудных интервалов – в соответствии с ограничением мощности крыльев и корректировками границ. Проведенные расчеты (решение задачи выбора вариантов расчета запасов технологического блока) показали, что лучшие значения по оценке запасов исходя из функции ценности и R^2-метрики дает третий вариант, при этом общие изменения показателей незначительны (до 10 %) при тех же параметрах, что и в технологическом регламенте. Это еще раз свидетельствует о том, что основная проблема переоценки запасов месторождения заключается в обработке и анализе радиологических данных и в интерпретации на их основе значений $K_{рр}$, а также объемных и качественных показателей запасов урана.

Таблица 2

Формирование исходного множества вариантов оценки запасов технологического блока

Варианты пересчета запасов	Критерии оценки вариантов (прирост запасов, %, λ -значимость критерия)			
	Критерий оценки рудных интервалов в эффективной мощности	Критерий оценки группировок сближенных скважин	Критерий оценки площади по проекциям фильтров	Условие переинтерпретации геофизических данных и корректировки границ рудного интервала
Вариант 1	8 % (λ_{11} = 0,57)	6 % (λ_{12} = 0,43)	×	×
Вариант 2	8 % (λ_{21} = 0,32)	6 % (λ_{22} = 0,24)	11 % (λ_{23} = 0,44)	×
Вариант 3	8 % (λ_{31} = 0,21)	6 % (λ_{32} = 0,16)	11 % (λ_{33} = 0,29)	13 % (λ_{34} = 0,34)

Таблица 3

Сравнительный анализ вариантов расчета запасов по сформированной совокупности оценочных критериев

Параметры технологического блока	Варианты подсчета запасов		
	1	**2**	**3**
Количество скважин в подсчете	71	71	71
Количество сгруппированных скважин	67	67	групп нет
Эффективная мощность закисляемого продуктивного горизонта ($M_э$, м)	14	14,6	14,2
Средняя рудная мощность (m, м)	8,88	9,41	9,09
Среднее содержание урана в руде (c, %)	0,1002	0,096	0,1043
Средняя продуктивность рудного тела (m_U, кг/м^2)	15,48	15,78	16,45
Площадь блока ($S_{бл}$, тыс. м^2)	33350	35100	35100
Функция ценности (объем запасов ($Q_з$, т))	516	554	577
R^2-метрика	$R^2(1)$	$R^2(2)$	$R^2(3) = \min\{R^2(1), R^2(2), R^2(3)\}$

Библиографический список

1. Физико-химическая геотехнология : учебник для вузов / В. Ж. Аренс, О. М. Гридин, Е. В. Крейнин, В. П. Небера, М. И. Фазлуллин, А. С. Хрулев, Г. Х. Хчеян. – Москва : Горная книга, 2010. – 575 с.
2. **Голик, В. И.** История и перспективы выщелачивания урана / В. И. Голик, В. И. Култышев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 138–143.
3. **Голик, В. И.** Геофизическое обеспечение технологий выщелачивания урана / В. И. Голик, В. Б. Заалишвили, О. З. Габараев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 7. – С. 112–121.
4. **Каримов, И. А.** Разработка сложноструктурного уранового оруденения подземного выщелачивания / И. А. Каримов, К. Ж. Хакимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 9. – С. 67–69.
5. **Верхотуров, А. Г.** Интенсификация добычи урана при использовании комплекса обработки прифильтровых зон геотехнологических скважин / А. Г. Верхотуров, А. А. Сабигатулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 7. – С. 13–20. – DOI 10.25018/02361493-2019-07-0-13-20.
6. **Джакупов, Д. А.** Повышение эффективности добычи урана методом подземного скважинного выщелачивания / Д. А. Джакупов // Инновационное развитие горнодобывающей отрасли : Междунар. науч.-техн. конф. – Кривой Рог, 2016. – С. 130–133.
7. **Живов, В. Л.** Уран: геология, добыча, экономика / В. Л. Живов, А. В. Бойцов, М. В. Шумилин. – Москва : Атомредметзолото, 2012. – 301 с.
8. Геотехнология урана : учеб. пособие / И. П. Поезжаев, К. Д. Полиновский, О. А. Горбатенко и др. ; под общ. ред. Ю. В. Демехова, Б. М. Ибраева. – Алматы. – 2017. – 327 с.
9. **Рогов, Е. И.** Оптимизация подготовленных и готовых к выемке запасов на рудниках подземного скважинного выщелачивания урана / Е. И. Рогов, В. Г. Язиков, А. Е. Рогов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 4. – С. 149–150.
10. **Сатыбалдиев, Б. С.** Оценка эффективности использования фильтрационного выщелачивания для извлечения урана из урановой руды / Б. С. Сатыбалдиев, Б. М. Уралбеков, М. М. Буркитбаев // Вестник Казахского национального университета. – 2015. – № 3. – С. 23–27.

References

1. Arens V. Zh., Gridin O. M., Kreynin E. V., Nebera V. P., Fazlullin M. I., Khrulev A. S., Khcheyan G. Kh. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya: uchebnik dlya vuzov* [Physical and chemical geotechnology: textbook for universities]. Moscow: Gornaya kniga, 2010, 575 p. [In Russian]
2. Golik V. I., Kultyshev V. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2011, no. 7, pp. 138–143. [In Russian]
3. Golik V. I., Zaalishvili V. B., Gabaraev O. Z. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2014, no. 7, pp. 112–121. [In Russian]
4. Karimov I. A., Khakimov K. Zh. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2015, no. 9, pp. 67–69. [In Russian]
5. Verkhoturov A. G., Sabigatulin A. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2019, no. 7, pp. 13–20. DOI 10.25018/02361493-2019-07-0-13-20. [In Russian]

6. Dzhakupov D. A. *Innovatsionnoe razvitie gornodobyvayushchey otrasli: Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative development of the mining industry: International scientific and technical conference]. Krivoy Rog, 2016, pp. 130–133. [In Russian]
7. Zhivov V. L., Boytsov A. V., Shumilin M. V. *Uran: geologiya, dobycha, ekonomika* [Uranium: geology, mining, economics]. Moscow: Atomredmetzoloto, 2012, 301 p. [In Russian]
8. Poezzhaev I. P., Polinovskiy K. D., Gorbatenko O. A. et al. *Geotekhnologiya urana: uchebnoe posobie* [Uranium geotechnology: teaching aid]. Almaty. 2017, 327 p. [In Russian]
9. Rogov E. I., Yazikov V. G., Rogov A. E. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin]. 2002, no. 4, pp. 149–150. [In Russian]
10. Satybaldiev B. S., Uralbekov B. M., Burkitbaev M. M. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta* [Bulletin of Kazakh National University]. 2015, no. 3, pp. 23–27. [In Russian]

Подрезов Денис Рустамович
соискатель, кафедра автоматизированных систем управления, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 4)

E-mail: dpodrezov81@rambler.ru

Podrezov Denis Rustamovich
Applicant, sub-department of automated control systems, MISIS National University of Science and Technology (4 Leninsky avenue, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Подрезов, Д. Р. Анализ системных связей показателей функционирования технологического блока и решение задачи выбора вариантов подсчета запасов на основе геофизических данных / Д. Р. Подрезов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 34–42. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-4.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.325.3
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-5

В. Н. Ашанин, А. А. Коротков

РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Технологический прорыв в области интегральной электроники обеспечивает производство датчиковой аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками, расширение их динамического диапазона преобразования, что, в свою очередь, делает актуальной задачу совершенствования вторичных измерительных преобразователей информации. В связи с этим в работе решается задача повышения точности интегрирующего аналого-цифрового преобразователя напряжения с промежуточным преобразованием в интервал времени.

Материалы и методы. Подробно описан алгоритм работы интегрирующего аналого-цифрового преобразования напряжения в интервал времени, обеспечивающий повышение точности преобразования за счет компенсации погрешности от краевых эффектов. Для разработки имитационной модели, подтверждающей корректность функционирования алгоритма, была использована программная среда NI Multisim 12.0.

Результаты. Разработана имитационная модель интегрирующего аналого-цифрового преобразователя напряжения в интервал времени. Приведено аналитическое описание реализации алгоритма, а также описание имитационной модели, реализующей алгоритм. Полученные результаты исследования линейности функции преобразования предлагаемого устройства подтверждают корректность функционирования алгоритма.

Выводы. Разработанная в программной среде NI Multisim имитационная модель, реализующая алгоритм интегрирующего аналого-цифрового преобразователя напряжения в интервал времени, показала высокую линейность преобразования. При заданных параметрах аналоговых узлов, стремящихся к идеальным, погрешность линейности функции преобразования отсутствует.

Ключевые слова: интегрирующий аналого-цифровой преобразователь напряжения в интервал времени, аналоговый интегратор, погрешность от краевых эффектов, время-импульсная модуляция, имитационная модель.

© Ашанин В. Н., Коротков А. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

V. N. Ashanin, A. A. Korotkov

IMPLEMENTATION OF AN INTEGRATING ANALOG-DIGITAL CONVERTER WITH INTERMEDIATE PULSE LATESTIMATION MODULATION

Abstract.

Bachground. The technological breakthrough in the field of integrated electronics provides the production of sensor equipment with high metrological characteristics, expansion of their dynamic range of conversion, which, in turn, makes improving secondary measuring converters of information relevant. In this regard, the problem of increasing the accuracy of an integrating analog-digital voltage converter with an intermediate transformation in the time interval is solved in the work.

Materials and methods. The article describes the detailed algorithm of the integrating analog-digital voltage conversion in the time interval, which provides an increased accuracy of the conversion due to compensation of the error from the edge effects. To develop a simulation model that confirms the correct functioning of the algorithm, the software environment NI Multisim 12.0 was used.

Results. A simulation model of an integrating analog-digital voltage converter to time interval has been developed. An analytical description of the algorithm implementation is given, as well as a description of the simulation model that implements the algorithm. The obtained investigation results of the linearity of the proposed device transformation function confirm the correct functioning of the algorithm.

Conclusions. The simulation model developed in the NI Multisim software environment that implements the algorithm of the integrating analog-to-digital voltage converter in the time interval showed high linearity of the conversion. With the given parameters of the analog nodes tending to ideal, there is no linearity error of the conversion function.

Keywords: integrating analog-to-digital converter of voltage in time interval, analog integrator, error from edge effects, time-pulse modulation, simulation model.

Введение

Интегрирующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) напряжения сигма-архитектуры с суммированием результатов преобразования частных циклов обладают высокой линейностью преобразования, эффективным подавлением внешних помех и внутренних шумов активных элементов [1, 2]. В силу специфики схемной реализации и алгоритма преобразования наибольшее распространение получили сигма-АЦП с промежуточной импульсно-разностной модуляцией напряжения, более известные как ∑Δ-АЦП. Их несомненным достоинством является высокая линейность функции преобразования, позволяющая реализовывать многоразрядные АЦП по цифровой интегральной технологии [3]. Однако, поскольку они относятся по классификационным признакам к сигнальным АЦП [4], их применение для решения задач измерительной техники, требующих привязки результата измерения ко времени измерения, сопряжено с определенными трудностями. Последние определяются нелинейной зависимостью длительности переходного процесса, возникающего при изменении входного напряжения из-за применения цифрового фильтра-дециматора с бесконечной импульсной характеристикой [5, 6]. Именно по этой причине для решения задач измерительной техники представляется целесообразной реализация алгоритма сигма-Т АЦП

на основе малоразрядных интегрирующих преобразователей напряжения в интервал времени с последующим суммированием результатов преобразования примыкающих частных циклов [2].

1. Описание алгоритма функционирования малоразрядного интегрирующего преобразователя напряжения в интервал времени

Известен интегрирующий преобразователь напряжения в интервал времени [6], недостатком которого является наличие погрешности дискретизации, приводящей при суммировании результатов частных циклов к погрешности преобразования от краевых эффектов. Целью данной работы является повышение точности преобразования за счет понижения данной составляющей погрешности. Поставленная цель достигается схемотехническим изменением структуры преобразователя и алгоритма его работы.

На рис. 1 изображена структурная электрическая схема предлагаемого интегрирующего аналого-цифрового преобразователя напряжения с промежуточной время-импульсной модуляцией (ВИМ), на рис. 2 – временные диаграммы напряжений в различных точках схемы, поясняющие принцип его работы (*А* – выходное напряжение генератора тактовой частоты *8*, *Б* – выходное напряжение интегратора *1*, *В* – выходное напряжение ключа *3*, *Г* – выходное напряжение интегратора *5*).

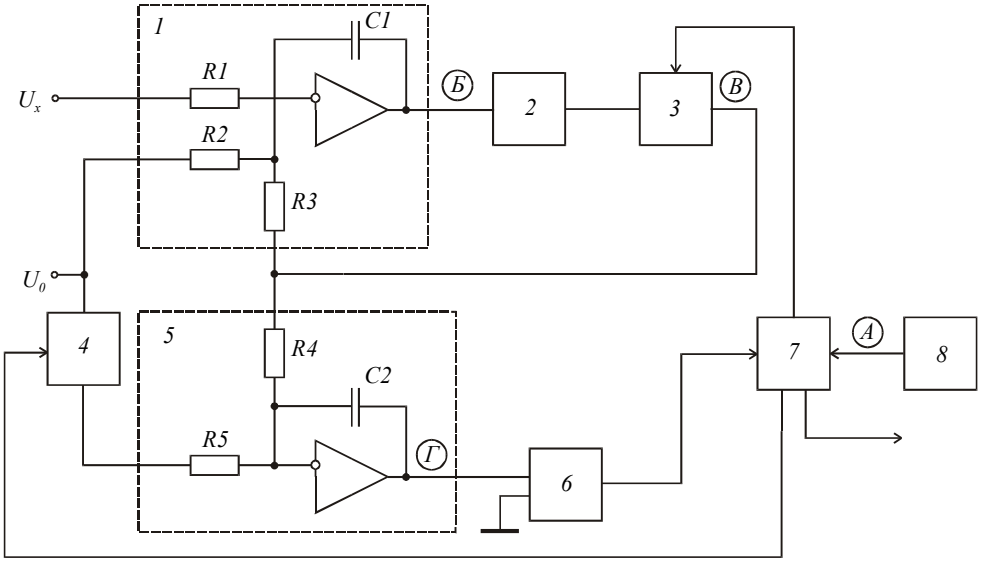


Рис. 1. Структурная электрическая схема интегрирующего АЦП с промежуточной ВИМ: *1* – первый инвертирующий интегратор; *2* – неинвертирующий усилитель напряжения; *3* и *4* – аналоговые ключи; *5* – второй инвертирующий интегратор; *6* – неинвертирующий усилитель напряжения – нуль-орган; *7* – устройство управления; *8* – генератор тактовой частоты

Работу преобразователя рассмотрим, начиная с момента времени t_1 (рис. 2). В этот момент ключ *3* разомкнут и интегратор *1* находится в начальном нулевом состоянии. Рассмотрим случай, когда преобразуемое входное U_x и опорное U_0 напряжения положительны.

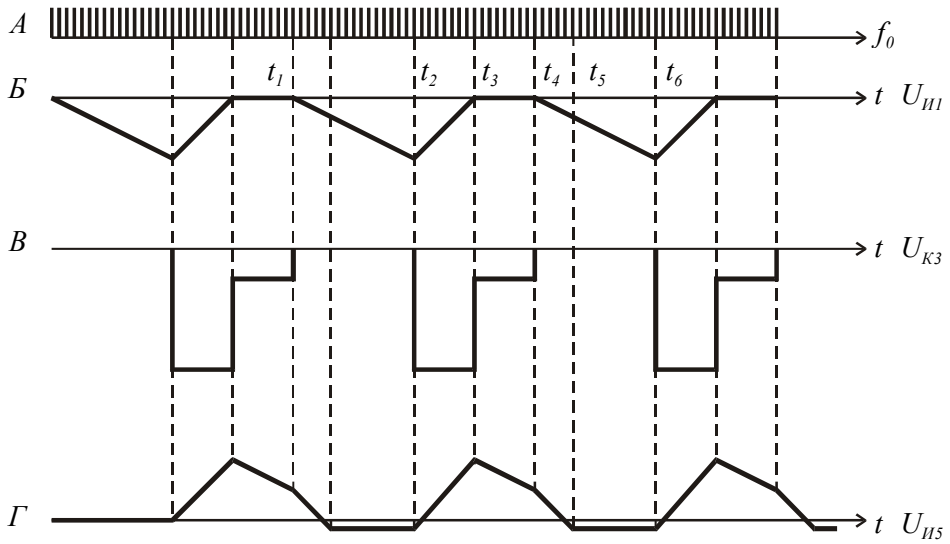


Рис. 2. Временные диаграммы

Начиная с момента t_1 напряжение на выходе интегратора *1*, изменяясь по закону

$$U_{и1}(t) = -U_x(t - t_1)/R_1C_1 - U_0(t - t_1)/R_2C_1,$$

достигает в момент времени t_2, соответствующий половине частного цикла преобразования $T_ц$, значения

$$U_{и1}(t_2) = -U_x(t_2 - t_1)/R_1C_1 - U_0(t_2 - t_1)/R_2C_1, \quad (1)$$

где R_1, R_2 и C_1 – элементы, входящие в схему интегратора *1*, определяющие его постоянную времени.

В этот же момент времени по сигналу с устройства управления *7* замыкается ключ *3*, и выходное напряжение отрицательной полярности, равное напряжению насыщения $U_{нс}$ неинвертирующего усилителя *2*, поступает на третий вход интегратора *1* и первый вход интегратора *5*.

На интервале времени от t_2 до t_3 напряжение на выходе интегратора *1* изменяется по закону

$$U_{и1}(t) = U_{и1}(t_2) - U_{нс}(t - t_2)/R_3C_1 - U_0(t - t_2)/R_2C_1 - U_x(t - t_2)/R_1C_1.$$

В момент t_3 достижения выходного напряжения интегратора *1* значения

$$U_{и1}(t_3) = U_{и1}(t_2) - U_{нс}(t_3 - t_2)/R_3C_1 - U_0(t_3 - t_2)/R_2C_1 - U_x(t_3 - t_2)/R_1C_1 \quad (2)$$

усилитель *2* выходит из насыщения, в результате чего замыкается контур глубокой отрицательной обратной связи, охватывающий через ключ *3* последовательно включенные интегратор *1*, усилитель *2*. Замкнутый контур представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени R_3C_1/K_2, где K_2 – коэффициент усиления усилителя *2*. Значение постоянной времени очень мало, поскольку K_2 весьма велико. В результате напряжение обратной связи на выходе замкнутой системы в момент t_3, после короткого переходного процесса, становится равным

$$U_{ос} = -U_xR_3/R_1 - U_0R_3/R_2.$$

Начиная с момента t_3 на выходе интегратора *1* устанавливается напряжение

$$U_{и1}(t) = U_{ос}/K_2,$$

что позволяет полагать $U_{и1}(t_3) \approx 0$ с учетом большого значения коэффициента K_2.

Вследствие этого выражение (2) приравниваем нулю. Откуда следует

$$U_{нс}(t_3 - t_2)R_3C_1 = - U_0(t_3 - t_2)R_2C_1 - U_x(t_3 - t_2)R_1C_1 + U_{и1}(t_2).$$

Подставляя сюда выражение (1) для интегратора $U_{и1}(t_2)$, получим

$$U_{нс}(t_3–t_2)/R_3C_1=–U_0(t_3–t_2)/R_2C_1–U_x(t_3–t_2)/R_1C_1–U_x(t_2–t_1)/R_1C_1–U_0(t_2–t_1)/R_2C_1,$$

откуда имеем

$$U_{нс}(t_3 - t_2) = U_0(t_3 - t_1)R_3/R_2 - U_x(t_3 - t_1)R_3/R_1.$$

Искомая площадь сигнала на выходе ключа *3* будет определяться выражением

$$U_{нс}(t_3 - t_2) + U_0(t_4 - t_3) = U_0(t_3 - t_1)R_3/R_2 -$$
$$- U_x(t_3 - t_1)R_3/R_1 - U_0(t_4 - t_3)R_3/R_2 - U_x(t_4 - t_3)R_3/R_1,$$

или, поскольку $t_4 - t_1 = T_ц$, получим

$$U_{нс}(t_3 - t_2) + U_0(t_4 - t_3) = - U_xT_цR_3/R_1 - U_0T_цR_3/R_1.$$

Сигнал с выхода ключа *3* поступает в течение интервала от t_2 до t_4 на второй аналоговый интегратор *5*, который к моменту t_2 находится в начальном состоянии. В результате напряжение на выходе интегратора *5* к моменту t_4 достигает значения

$$U_{и4}(t_4) = - U_{нс}(t_3 - t_2)/R_4C_2 - U_{ос}(t_4 - t_3)R_4/C_2 - U_0(t_4 - t_2)/R_5C_2.$$

С момента t_4 начинается интегрирование опорного напряжения и в момент времени, непосредственно предшествующий t_5, выходное напряжение интегратора *5* достигает нулевого уровня, что приводит к срабатыванию нуль-органа *6*, скачком изменяющего свое выходное напряжение. Соответствующий сигнал поступает на устройство управления *7*, которое, с приходом первого очередного импульса генератора тактовой частоты, выдает сигнал на размыкание ключа *4*.

Определим длительность интервала времени $T_x = t_5 - t_4$, который и является информативным. Окончательно получим

$$\Delta T = t_5 - t_4 = R_5C_2U_{и4}(t_4)/U_0 = T(R_5R_3/R_1R_4)(U_x/U_0) + T(R_5R_3/R_2R_4) - T/2.$$

Интегратор *5* находится в начальном ненулевом состоянии до момента времени t_6, когда начинается новый цикл работы преобразователя, который учитывает остаток интегрального значения входного напряжения за предыдущий частный цикл преобразования.

Выходной код устройства управления *7* интегрирующего АЦП напряжения определяется как сумма результата преобразования за несколько примыкающих частных циклов преобразователя напряжения в интервал времени, что, естественно, уменьшает погрешность дискретизации кратно числу суммируемых циклов.

2. Реализация алгоритма в виде имитационной модели

Рассмотренный алгоритм реализован в программной среде NI Multisim. Модель и осциллограммы ее работы представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Каждый полный цикл преобразования (в разработанной модели 20 мс) содержит 10 частных циклов по 2 мс, за длительность которых умещается по 10^4 периодов кодирующих импульсов частотой 5 МГц.

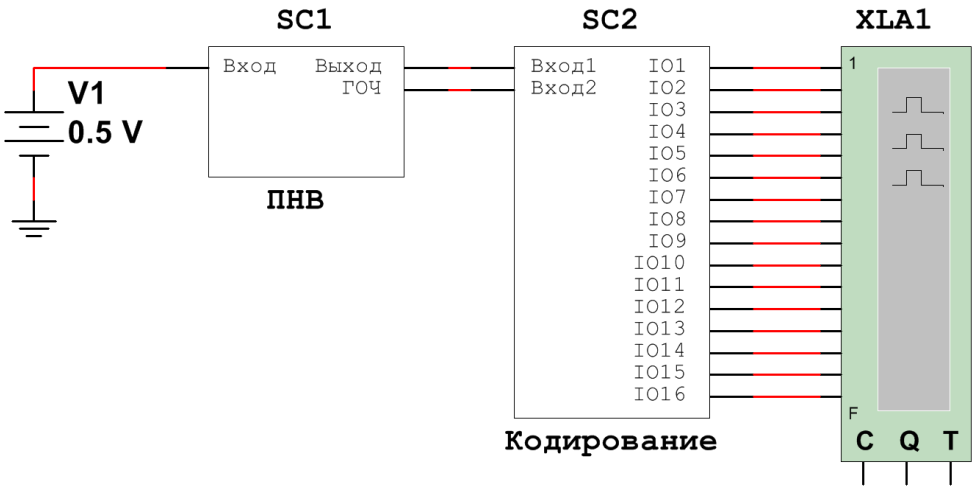


Рис. 3. Multisim-модель преобразователя напряжение-время с идеальными параметрами элементов

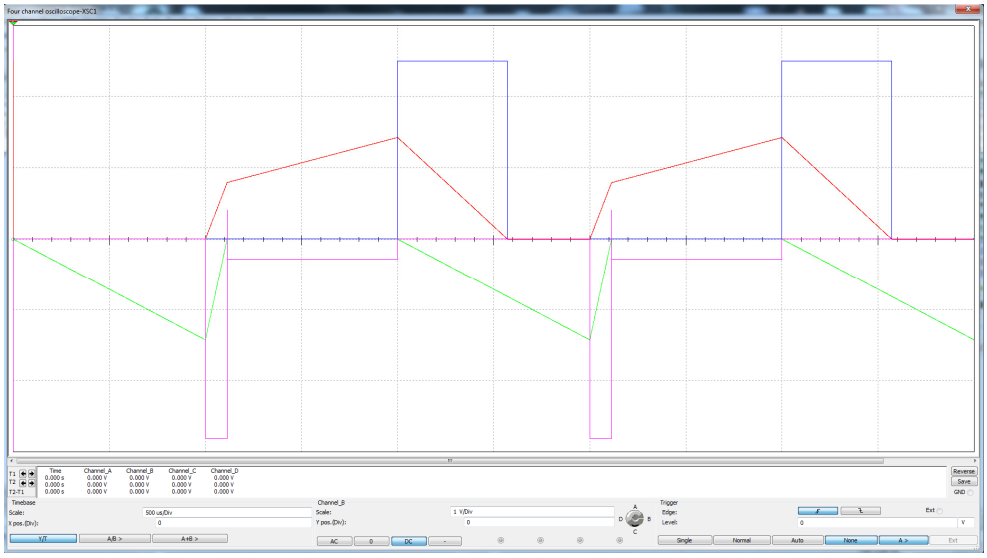


Рис. 4. Осциллограммы работы преобразователя напряжение-время

Осциллограммы снизу-вверх принадлежат следующим выходным напряжениям узлов функциональной схемы: ключа *3*, интегратора *1*, интегратора *5*, второго выхода устройства управления (УУ) (информативный интервал, он же сигнал управления ключом *4*).

Поскольку модельный лист имеет размерные ограничения, устройство структурно разделено на две подсистемы (SC1 и SC2), имитирующие преобразователь напряжения в интервал времени и подсистему кодирования информативного интервала $t_4 \ldots t_5$. Входное напряжение задается источником V1. Блок XLA1 представляет собой 16-разрядный логический анализатор. Все аналоговые узлы модели имеют заданные параметры, стремящиеся к идеальным.

Подсистема SC1 (рис. 5) полностью соответствует функциональной схеме на рис. 1 (отличается лишь присутствием осциллографа для отладки и наличием непосредственно в подсистеме ИОН – источника опорного напряжения U_0).

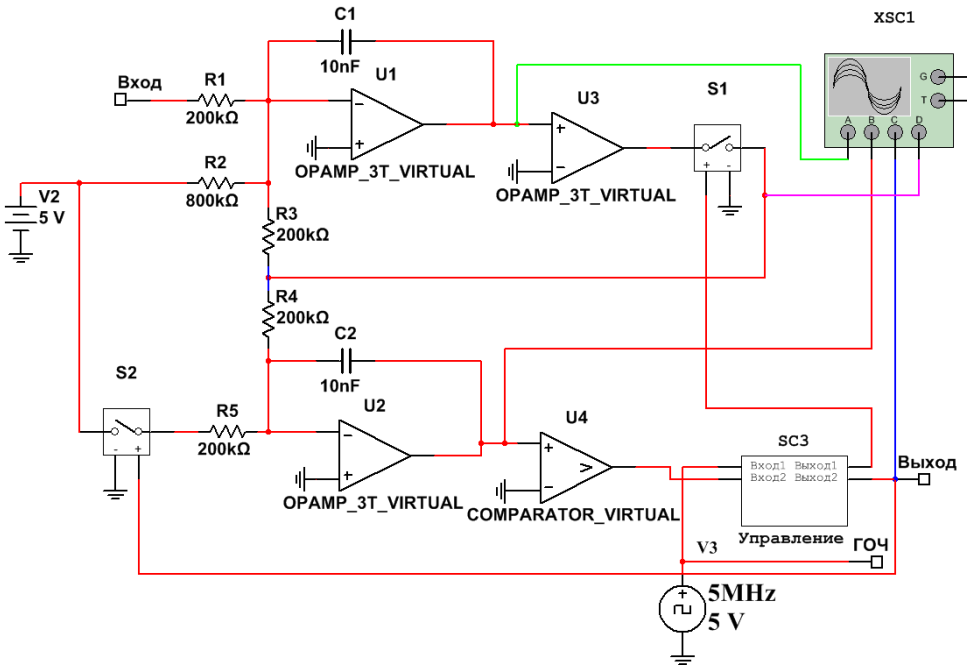


Рис. 5. Подсистема SC1

ИОН представлен блоком V2, генератор опорной частоты (ГОЧ) – V3. Аналоговый интегратор *1* реализован на операционном усилителе ОУ (U1), конденсаторе C1 и резисторах R1–R3. Второй интегратор *5* построен на ОУ (U2), C2, R4, R5; неинвертирующий усилитель – на ОУ U3; нуль-орган – на компараторе U4; аналоговые ключи *3* и *4* – на блоках S1 и S2 соответственно. Блок устройства управления УУ реализован в подсистеме SC3 (рис. 6).

Устройство управления представляет собой последовательно соединенные делитель частоты (блоки U5–U7), логические элементы НЕ (U8, U9) и RS-триггер (SC4). Делитель частоты необходим, чтобы задавать соотношение длительности частных циклов преобразования и тактирующих (кодирующих) импульсов. Делитель может быть реализован разными способами. В данной модели сигнал управления ключом *3* имеет период 2 мс и скважность 2. Логические элементы НЕ перед триггером формируют необходимые фронты для управления ключом *4*. С выхода триггера снимается управляющий сигнал, который представляет собой информативный интервал $t_4 \ldots t_5$. Второй выход подсистемы управления соединен с первым входом подсистемы коди-

рования (SC2), так же как и выход генератора опорной частоты ГОЧ подсистемы SC1 со вторым входом подсистемы SC2 (рис. 7).

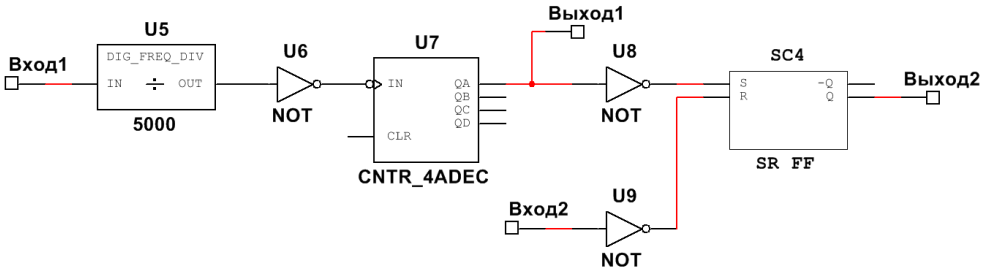


Рис. 6. Устройство управления

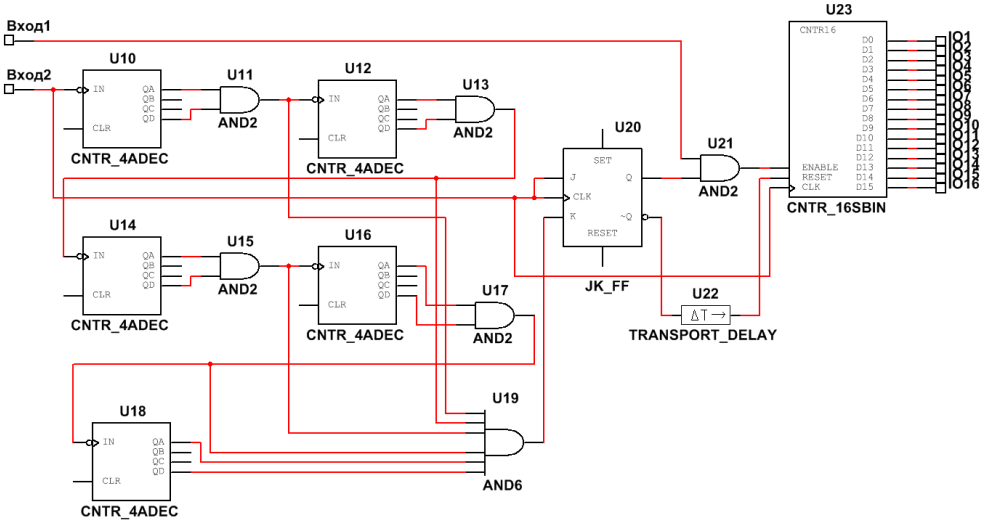


Рис. 7. Подсистема SC2

Подсистема кодирования (SC2) представляет собой последовательно соединенные формирователь полного цикла (U10–U20) и непосредственно кодирующий счетчик (U23). Делитель частоты (пять 4-разрядных десятичных счетчиков и логические И-блоки U10–U19) и JK-триггер (U20) формируют последовательность полных циклов преобразования по 20 мс. Логический элемент И (U21) совмещает длительности полного цикла и последовательности информативных интервалов ΔT. Цифровая задержка (U22) сброса счетчика необходима, чтобы счетчик учел в полном цикле все 10 информативных интервалов частных циклов преобразования.

В ходе тестирования разработанной модели был проведен ряд замеров выходного двоичного кода. На вход преобразователя напряжение-время подавалось напряжение в диапазоне от –1 до 1 В с шагом 0,05 В. Модель показала отсутствие методической погрешности преобразования от краевых эффектов и, как следствие, идеальную линейность преобразования. При переводе двоичного выходного кода в десятичную форму получились значения от 5000 до 45000 с шагом 1000. Значение количества кодирующих импульсов 5000 в полном цикле при входном сигнале –1 В свидетельствует о наличии

запаса в диапазоне значений преобразуемого напряжения (±0,25 В). Диапазон значения преобразуемого напряжения определяется отношением сопротивлений R_5R_3/R_2R_4 и величиной опорного напряжения. Так, например, путем простых манипуляций с сопротивлением R_2 можно менять длительность ΔT относительно длительности частного цикла. Шагу 0,05 В соответствует 1000 периодов кодирующих импульсов; поскольку в данной модели полный цикл содержит 10 частных, то 10 кодирующим импульсам соответствует изменение входного напряжения на 0,0005 В. Задействованы все 16 разрядов двоичного счетчика.

Несложно собрать модель устройства с более высокой частотой заполнения информативного интервала кодирующими импульсами (путем модификации/добавления делителя частоты и повышения частоты ГОЧ) для преобразования малых значений напряжения (единицы микровольт) и, таким образом, получить разрешающую способность более 16 бит, однако работу имитационной модели такого устройства будет сложно оценить средствами NI Multisim. Связано это с необходимостью расстановки последовательно соединенных счетчиков с переносом и соответствующего количества блоков логического анализатора. Для оценки достоверности корректности работы алгоритма вполне подходит разработанная модель 16-разрядного интегрирующего АЦП.

Также, помимо линейности функции преобразования, была исследована реакция АЦП на сетевую помеху в виде гармонического входного сигнала (синусоида) частотой 50 Гц и амплитудой 1 В. В данном случае на выходе логического анализатора отобразился код, свидетельствующий о практически полном подавлении сетевой помехи. Для гармонического воздействия частотой 50, 49,5, 49 Гц помехоподавление интегрирующего АЦП без входного фильтра составило –76,5, –70,5, –55,7 дБ соответственно.

Заключение

Представленный алгоритм интегрирующего АЦП с промежуточным преобразованием напряжения в интервал времени работает корректно, обеспечивая высокую линейность преобразования, что подтверждает приведенная имитационная модель. Исследования линейности преобразования показывают, что при идеальных параметрах аналоговых узлов отклонения полностью отсутствуют. Симуляция реакции преобразователя напряжение-время на сетевую помеху показала достаточно высокое ее подавление. Для увеличения значения ее подавления возможно использование весового интегрирования входного напряжения, подробно описанного в монографии [2].

Библиографический список

1. **Ашанин, В. Н.** ΣΔ-АЦП: основы теории и проектирование : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 188 с.
2. **Ашанин, В. Н.** Теория интегрирующего аналого-цифрового преобразования : монография / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувыкин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 214 с.
3. **Ashanin, V. N.** Development of Engineering Application for a Choice of Data Converters with Sigma Delta Architecture / V. N. Ashanin, B. V. Chuvykin,

A. A. Korotkov, I. A. Sidorova // Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th International Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE), (Russia, Moscow, April 15–17, 2015). – Moscow, 2015. – P. 251–254.

4. **Шлыков, Г. П.** Характеристики измерительных и сигнальных аналого-цифровых преобразователей / Г. П. Шлыков // Цифровая информационно-измерительная техника : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 11. – Пенза : Изд-во Пенз. политехн. ин-та, 1981. – С. 26–29.
5. **Ашанин, В. Н.** Особенности оценки погрешности измерения преобразователей информации с передискретизацией сигнала / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувыкин // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Вып. 10. – Пенза : ПГТА, 2009. – С. 10–11.
6. **Ашанин, В. Н.** Метод определения длительности переходного процесса в ΣΔ-АЦП с однобитным Δ-модулятором высокого порядка / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувыкин, Р. Г. Тер-Аракелян // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 70–81.
7. **Ашанин, В. Н.** Преобразователь напряжения во временной интервал / В. Н. Ашанин, В. С. Гутников // Приборы и системы управления. – 1982. – № 9. – С. 31–32.

References

1. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *ΣΔ-ATsP: osnovy teorii i proektirovanie: monografiya* [*ΣΔ-ATsP: fundamentals of theory and design: monograph*]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009, 188 p. [In Russian]
2. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Shakhov E. K. *Teoriya integriruyushchego analogo-tsifrovogo preobrazovaniya: monografiya* [Theory of integrating analog and digital conversion: monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PenzGU, 2009. – 214 s. [In Russian]
3. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Korotkov A. A., Sidorova I. A. *Selected, peer reviewed papers from the 2015 The 5th Inter-national Workshop on Computer Science and Engineering-Information Processing and Control Engineering (WCSE 2015-IPCE), (Russia, Moscow, April 15–17, 2015)*. Moscow, 2015, pp. 251–254.
4. Shlykov G. P. *Tsifrovaya informatsionno-izmeritel'naya tekhnika: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Digital information and measurement technology: university collected works]. Issue 11. Penza: Izd-vo Penz. politekhn. in-ta, 1981, pp. 26–29. [In Russian]
5. Ashanin V. N., Chuvykin B. V. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technology: proceedings of International scientific and technical conference]. Issue 10. Penza: PGTA, 2009, pp. 10–11. [In Russian]
6. Ashanin V. N., Chuvykin B. V., Ter-Arakelyan R. G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 70–81. [In Russian]
7. Ashanin V. N., Gutnikov V. S. *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems]. 1982, no. 9, pp. 31–32. [In Russian]

Ашанин Василий Николаевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электротехники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

Ashanin Vasiliy Nikolaevich
Candidate of engineering sciences, associate professor, head of the sub-department of electric power and electrical engineering, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

E-mail: eltech@pnzgu.ru

Коротков Алексей Александрович
инженер-конструктор II категории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44);
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: lexifer@mail.ru

Korotkov Aleksey Aleksandrovich
Design engineer of the 2nd category,
Research Institute of Electronic
and Mechanic Devices (44 Karakozova
street, Penza, Russia); postgraduate
student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Ашанин, В. Н. Реализация интегрирующего аналого-цифрового преобразователя с промежуточной широтно-импульсной модуляцией / В. Н. Ашанин, А. А. Коротков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 43–53. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-5.

УДК 621.31
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-6

Н. Г. Востоков, А. С. Горбунов

СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ РАЗМЫТИЯ СПЕКТРА

Аннотация.

Актуальность и цели. Проведено снижение электромагнитного излучения электронного устройства посредством применения в процессоре технологии размытия спектра тактовой частоты. Описаны основные параметры размытия спектра. Даны рекомендации и обоснования выбора значений параметров. Несмотря на то, что данная технология запатентована около 80 лет назад, свое широкое распространение она получила только в настоящее время.

Материалы и методы. Представлены результаты опытов по изучению влияния параметров ширины и частоты модуляции размытия спектра на электромагнитное излучение. Опыты проводились на процессоре i.MX6ULL в составе вычислительного модуля макета. Кроме того, представлены графики измерения электромагнитного излучения размытого спектра с разной частотой модуляции.

Результаты. Разработанный алгоритм позволяет изменять параметры функции размытия спектра непосредственно в процессе работы устройства. На основе предложенного алгоритма создан специализированный модуль ядра операционной системы. Приведены плюсы и минусы использования технологии размытия спектра тактовой частоты процессора.

Выводы. Практическая значимость алгоритма состоит в существенном сокращении времени проведения тестирования с различными наборами параметров.

Ключевые слова: размытие спектра, тактирование, электромагнитное излучение, Hershey-Kiss.

N. G. Vostokov, A. S. Gorbunov

REDUCTION OF THE ELECTROMAGNETIC RADIATION OF AN ELECTRONIC DEVICE USING THE SPREAD SPECTRUM TECHNOLOGY

Abstract.

Background. The reduction of electromagnetic radiation of an electronic device through the use of spread spectrum technology of the clock frequency in the processor. The basic parameters of the spread spectrum are described. Recommendations and justifications for the choice of parameter values are given. Despite the fact that this technology was patented about 80 years ago, it has received its wide distribution only at the present time.

© Востоков Н. Г., Горбунов А. С., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. The results of experiments on the influence of the parameters of the width and frequency of the spread spectrum modulation on electromagnetic radiation are presented. The experiments were carried out on the i.MX6ULL processor as part of the computational module of the layout. In addition, graphs of measuring electromagnetic radiation of a spread spectrum with different modulation frequencies are presented.

Results. An algorithm has been developed that allows you to change the parameters of the spread spectrum function directly during the operation of the device. Based on the proposed algorithm, a specialized operating system kernel module has been created.

Conclusions. The practical significance of the algorithm consists in a significant reduction in the time of testing with various sets of parameters.

Keywords: spread spectrum, clocking, electromagnetic radiation, Hershey-Kiss.

Введение

Современные электронные устройства обычно состоят из набора электронных компонентов, таких как центральный процессор, модули памяти, контроллеры периферийных устройств, работающих на высоких частотах – до нескольких гигагерц. При работе устройств возникает побочное электромагнитное излучение (ЭМИ), которое оказывает нежелательное влияние на другие электронные устройства, рядом расположенные (например, радиоприемники, телевизоры, чувствительные медицинские приборы) [1]. Это же электромагнитное излучение может привести к потенциальной утечке конфиденциальной информации.

При разработке устройств применяют разные методы борьбы с ЭМИ: экранирование, разделение цепей питания, замену электронных компонентов на аналогичные с лучшими характеристиками по ЭМИ, установку фильтрующих компонентов и т.д.

Помимо описанных аппаратных доработок, ЭМИ можно снизить аппаратно-программными средствами с помощью технологии размытия спектра частоты тактирования (Spread Spectrum Clock Generation), также именуемой «тактирование шумоподобным сигналом». Технология размытия спектра была запатентована в 1942 г. для противодействия глушению сигнала, но получила широкое распространение только в настоящее время. Указанная технология позволяет в процессе работы циклически менять рабочую частоту компонента в некотором диапазоне, что приводит к сглаживанию пика частоты до более пологой формы. Технология размытия спектра нашла применение в стабилизаторах питания [2], тактовых генераторах [3–5], микроконтроллерах и процессорах.

Нормативным документом (ГОСТ 30805.22–2013 «Совместимость технических средств электромагнитная») ограничиваются пиковые значения ЭМИ на конкретных частотах, при этом не регламентируется суммарное значение ЭМИ на диапазоне частот. Поэтому технология размытия спектра частоты, снижающая пиковые уровни ЭМИ, хорошо подходит для выполнения требований нормативных документов. Стоит отметить, что суммарная энергия ЭМИ размытого спектра по сравнению с одиночным пиком не уменьшается.

ЭМИ от процессора возникают в результате функционирования встроенных синхронных схем процессора под воздействием тактовых импульсов.

На частоте тактовых импульсов и гармоник будут формироваться характерные пики, уровень которых необходимо снизить для соблюдения нормативов. Размытие спектра может повлиять на стабильность работы системы, а также привести к снижению быстродействия, поэтому требуется всесторонняя проверка функционирования конечного устройства с включенной опцией.

Как правило, аппаратные доработки дают хороший результат, но требуют высокой квалификации схемотехников и конструкторов, большие временные и финансовые затраты на разработку электронных плат и экранированного корпуса для улучшенной версии устройства. В свою очередь, программное использование технологии размытия спектра частоты тактирования, входящей в состав микроконтроллера или микропроцессора, не требует высокой квалификации разработчика, финансовых затрат, но и результат снижения ЭМИ гораздо ниже, чем от применения аппаратных доработок.

Параметры размытия спектра частоты

Главным образом на пиковое значение ЭМИ размытого спектра влияют следующие параметры:

– ширина спектра;
– расположение;
– частота модуляции;
– профиль модуляции.

Увеличение ширины спектра позволяет снизить общее пиковое значение ЭМИ. Необходимо понимать, что слишком большая ширина может привести к нестабильности работы процессора, а также синхронных коммуникационных интерфейсов. Обычно выбирают значение в диапазоне 0,25–5 %.

В зависимости от максимальной рабочей частоты процессора возможны три варианта расположения размытия спектра: центральное, верхнее и нижнее. Центральное размытие используется, когда процессор поддерживает увеличение рабочей частоты (overclocking). При таком расположении производительность процессора не изменяется, так как модулированная частота варьируется симметрично относительно рабочей частоты. Верхнее размытие идентично центральному, но с предварительным увеличением основной частоты на половину ширины спектра размытия. Нижнее размытие используется, когда процессор уже работает на максимально возможной частоте. В таком случае средняя рабочая частота уменьшается на половину ширины спектра, что ведет к снижению производительности (рис. 1).

Большое влияние на результирующий спектр ЭМИ оказывает профиль модуляции (рис. 2). Синусоидальный профиль модуляции обычно не применяется для размытия спектра, потому что при его использовании формируются значительные пограничные пики. Линейный (треугольный) профиль формирует спектр сигнала с менее выраженными пиками по краям. Идеальным профилем модуляции, при котором достигается стабильный уровень ЭМИ по всей ширине размытия спектра, считается кривая Hershey-Kiss [6].

Частота модуляции описывает, как часто сдвигается выходная частота по ширине спектра размытия. При редком шаге в спектре будет присутствовать хорошо различимые пики. Частая смена выходной частоты позволяет добиться более равномерного ЭМИ по всему спектру размытия.

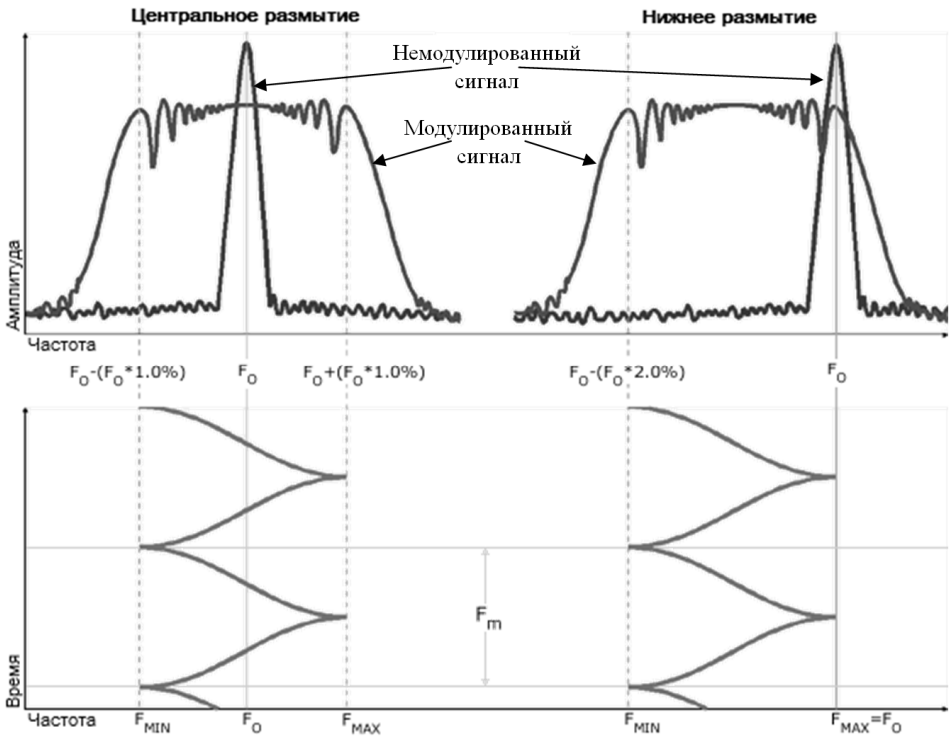


Рис. 1. Центральное и нижнее размытие спектра

Обобщая вышеописанные параметры, модулированную частоту можно представить следующей формулой:

$$F = F_{\text{осн}} + A(f_{\text{mod}}(t) - X),$$

где $F_{\text{осн}}$ – основная частота работы без размытия спектра; A – ширина размытия спектра; $f_{\text{mod}}(t)$ – функция модулирования частоты; X – расположение спектра (0 – верхнее, 1/2 – центральное, 1 – нижнее).

Рассмотрим пример снижения ЭМИ в разработанном устройстве с помощью размытия спектра тактовой частоты в процессоре архитектуры ARM i.MX6ULL от компании NXP.

Для тактирования процессора используется кварцевый резонатор стабильной частоты 24 МГц. Частота входного тактового сигнала повышается в процессоре с помощью умножителя частоты на основе системы фазовой автоподстройки частоты PLL (Phased Locked Loop). Таким образом, ядро процессора тактируется частотой 728 МГц.

Для i.MX6ULL в соответствии с документацией [7] поддерживается только нижнее расположение размытия спектра. Профиль модуляции не указан, но, судя по диаграммам измерений, используется профиль Hershey-Kiss. С помощью конфигурации регистров процессора CCM_ANALOG_PLL_SYS_SS, CCM_ANALOG_PLL_SYS_DENOM можно изменять ширину спектра и частоту модуляции в широких пределах.

В соответствии с рекомендациями производителя параметры размытия спектра необходимо устанавливать в начале старта загрузчика U-Boot до

инициализации контроллера оперативной памяти. В процессе отладки изделия выяснилось, что возможно управление функцией размытия спектра в процессе работы операционной системы (ОС).

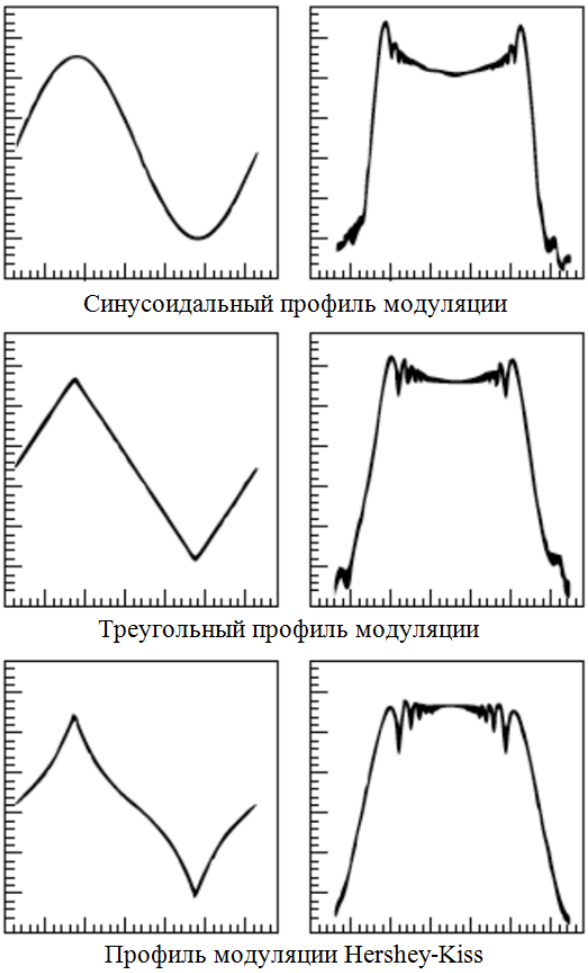


Рис. 2. Форма спектра ЭМИ в зависимости от профиля модуляции

В ходе изучения параметров спектра разработан алгоритм управления функцией размытия (рис. 3), который отличается взаимодействием программного модуля с контроллером процессора через интерфейс ядра Linux, позволяющий изменять параметры функции размытия спектра в процессе работы устройства. На основе алгоритма был создан специализированный модуль ядра, который принимает параметры при загрузке в работу.

При загрузке модуля ядра в регистры процессора записываются указанные в параметрах значения регистров. При выгрузке модуль ядра записывает значения в регистры для отключения функции размытия спектра.

Использование модуля ядра позволило многократно сократить временные затраты на проведение тестирований с разными наборами параметров. Перекомпиляция загрузчика с новыми параметрами, перенос загрузчика в устройство и запуск устройства в рабочий режим занимали порядка 5 мин.

Альтернативный алгоритм позволяет применить новые параметры за несколько секунд. Данный алгоритм также можно использовать при поиске оптимальных параметров размытия спектра для соблюдения нормативных требований.

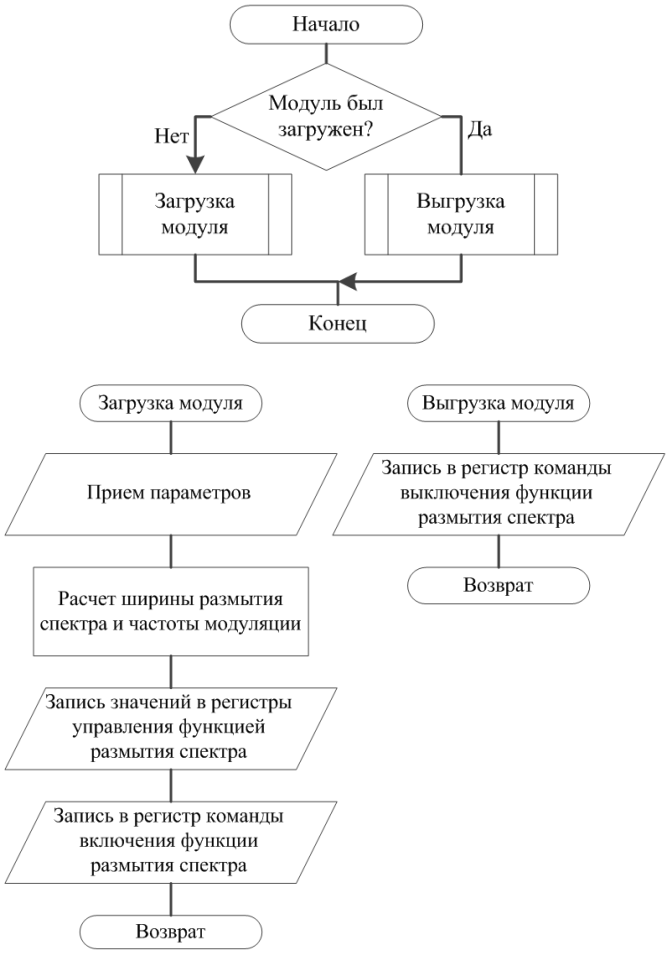


Рис. 3. Алгоритм управления функцией размытия спектра

Измерения ЭМИ от разработанного устройства производились с помощью комплекса электромагнитного анализа на основе сканера ЭМИ Detectus AB RSE644 и анализатора спектра Keysight N9000B [8]. Для измерения электрического поля был использован специализированный пробник Langer EMV XF-E 04s, который обнаруживает электрические поля в диапазоне от 30 МГц до 6 ГГц (рис. 4).

Для получения наиболее точных результатов измерений пробник размещается над микросхемой процессора в точке наивысшей амплитуды сигнала на частоте 728 МГц (рис. 5). Источником такого сигнала от микросхемы является ядро процессора или схема умножителя частоты.

Для снятия наглядных диаграмм ЭМИ необходимо задавать полосу пропускания, больше значения частоты модуляции, потому что в каждый мо-

мент времени процессор работает на одной частоте из всей ширины размытия спектра [9]. Также для наглядности уровня ЭМИ можно использовать функцию усреднения сигнала. На рис. 6 приведены диаграммы с усреднением и без него.

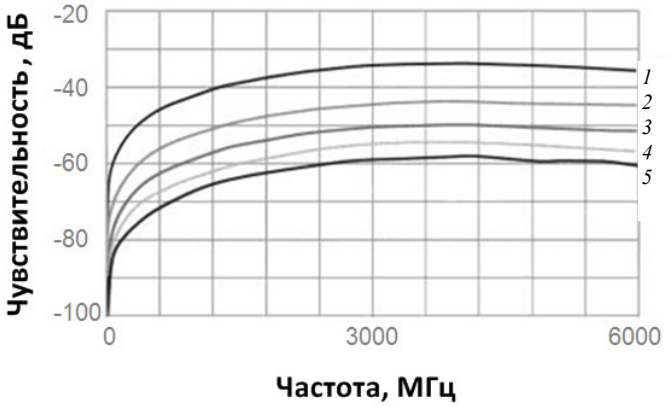


Рис. 4. Частотные характеристики пробника Langer EMV XF-E 04s. Расстояние до пробника (мм): *1* – 0,5; *2* – 2,5; *3* – 5,0; *4* – 7,5; *5* – 1,0

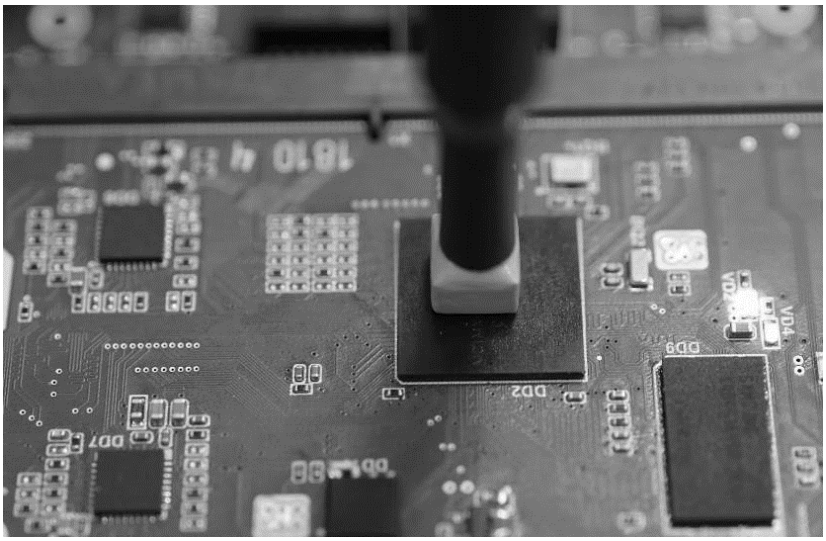


Рис. 5. Размещение пробника над микросхемой процессора

Сначала был проведен опыт с варьированием ширины спектра размытия для изучения зависимости от нее максимального значения ЭМИ. Диаграмма зависимости приведена на рис. 7.

По результатам измерений можно отметить расширение полосы спектра ЭМИ, а также снижение пиков излучений более чем на 15 дБмкВ. При ширине размытия спектра более 100 МГц наблюдались критические ошибки в работе ОС. В итоге была выбрана ширина размытия спектра в 6 МГц как компромисс между падением производительности и необходимым уровнем снижения ЭМИ.

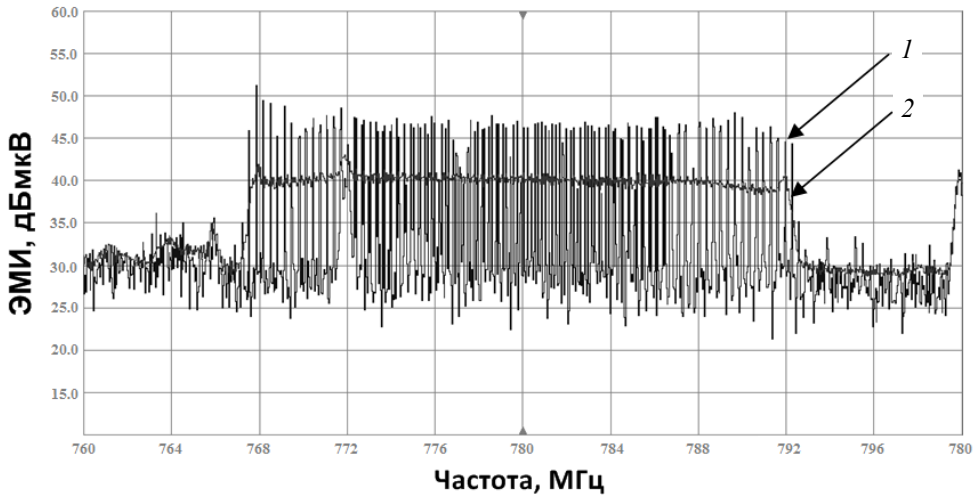


Рис. 6. Измерение ЭМИ размытого спектра с усреднением (*1*) и без него (*2*)

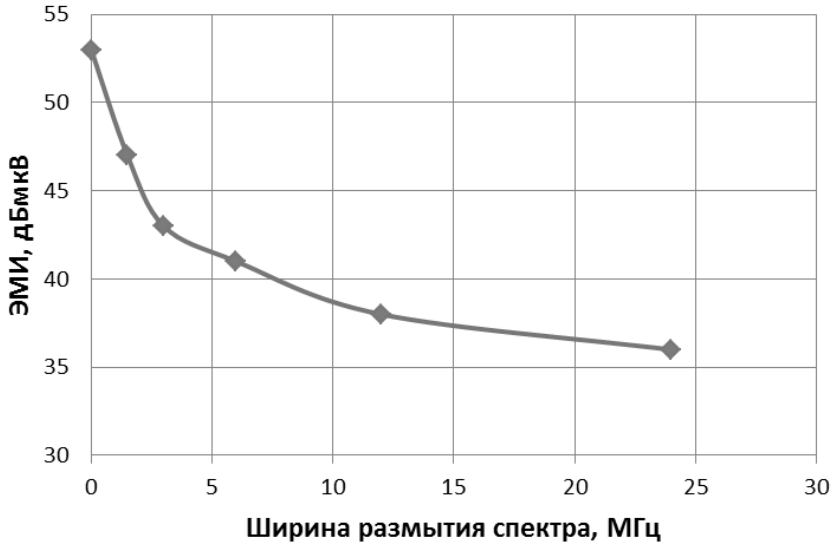


Рис. 7. Диаграмма зависимости ЭМИ от ширины размытия спектра

Дополнительно была проведена серия измерений для изучения влияния частоты модуляции на спектр ЭМИ. На рис. 8 представлены диаграммы спектров ЭМИ при разных значениях частоты модуляции. Можно отметить, что с увеличением частоты модуляции спектр становится менее равномерным, соответственно появляются пики излучений на некоторых частотах. Частота модуляции 12 кГц дает самое равномерное распределение ЭМИ по всей полосе размытия спектра.

Заключение

Результаты проведенных практических опытов показали, что функция размытия спектра, встроенная в процессор, снижает уровень ЭМИ по основ-

ной тактовой частоте. Применение технологии размытия спектра имеет следующие преимущества:

– при минимальных временных затратах позволяет заметно снизить пики ЭМИ;

– может использоваться для уже разработанного устройства.

Использование данной технологии имеет и отрицательные последствия:

– возможны снижение производительности и появление нестабильности в работе устройства;

– не наблюдается снижение суммарной мощности ЭМИ, в отличие от аппаратных доработок;

– ЭМИ возникают на всей ширине полосы размытия спектра.

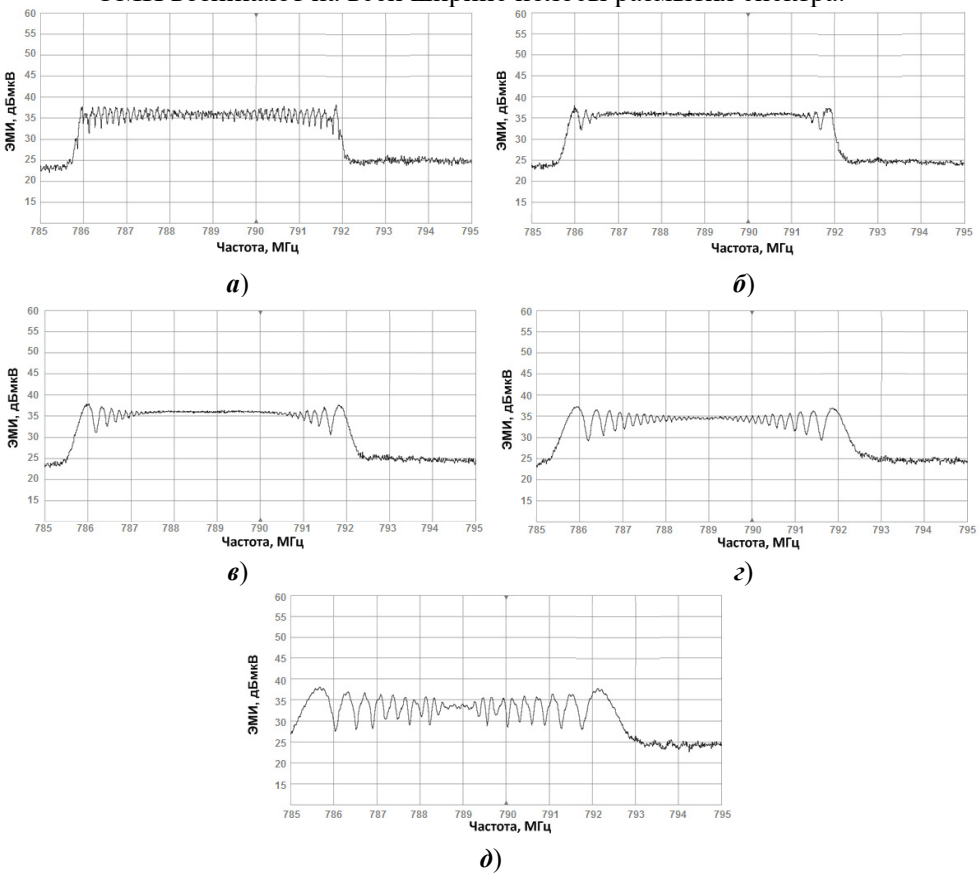


Рис. 8. Серия измерения ЭМИ с разными значениями частоты модуляции размытия спектра. Частоты модуляции:
а – 6 кГц; ***б*** – 12 кГц; ***в*** – 24 кГц; ***г*** – 48 кГц; ***д*** – 96 кГц

При разработке устройств, подлежащих проверке по нормативам ЭМИ, желательно выбирать электронную компонентную базу (генераторы, стабилизаторы, микроконтроллеры, процессоры) с поддержкой технологии размытия спектра. Их использование может снизить возможные затраты времени и материала на аппаратные доработки или разработку новых ревизий устройств для снижения ЭМИ. Немалую роль в применении технологии играет выбор оптимальных параметров функции размытия спектра.

Библиографический список

1. **Skinner, H. G.** Why spread spectrum clocking of computing devices is not cheating / H. G. Skinner, K. P. Slattery // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2001. – № 1. – P. 537–540.
2. **Макаренко, В. В.** Анализ эффективности использования технологии Spread Spectrum для снижения уровня кондуктивных помех DC/DC-преобразователей / В. В. Макаренко, В. В. Пилинский // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – № 24. – С. 97–103.
3. **Кочемасов, В. Н.** Тактовые генераторы с распределенным спектром / В. Н. Кочемасов, Е. Р. Хасьянова // Электронные компоненты. – 2013. – № 5. – С. 68–71.
4. **Сысоева, О. В.** Методы проектирования тактовых генераторов с распределенным спектром / О. В. Сысоева, А. Е. Агафонов, П. Г. Кириченко // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014 : сб. тр. / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – Москва : ИППМ РАН, 2014. – Ч. 3. –С. 77–80.
5. **Табатабаи, С.** Управление тактовым сигналом при подавлении электромагнитных помех / С. Табатабаи // Электронные компоненты. – 2011. – № 7. – С. 10–13.
6. **Hyung-Min, Park.** SSCG with Hershey-Kiss modulation profile using Dual Sigma-Delta modulators / Park Hyung-Min, Jin Hyun-Bae, Kang Jin-Ku // IEICE Electronics Express. – 2010. – Vol. 7, № 18. – P. 1349–1353.
7. i.MX 6ULL Applications Processor Reference Manual, Rev. 1, 11/2017, NXP Semiconductors.
8. **Горбунов, А. С.** Использование комплекса электромагнитного анализа корпусированных изделий для оценки электромагнитной совместимости электронных устройств / А. С. Горбунов, Д. М. Зиновьев, Н. Г. Востоков, Ал. С. Горбунов // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 12. – С. 29–35.
9. **Deutschmann, B.** Spread spectrum parameter optimization to suppress certain frequency spectral components / B. Deutschmann, B. Auinger, G. Winkler // Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, 2017, EMCCompo. – 2017. – № 7998078. – P. 39–44.

References

1. Skinner H. G., Slattery K. P. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2001, no. 1, pp. 537–540.
2. Makarenko V. V., Pilinskiy V. V. *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi* [Electrical and computer systems]. 2017, no. 24, pp. 97–103.
3. Kochemasov V. N., Khas'yanova E. R. *Elektronnye komponenty* [Electronic components]. 2013, no. 5, pp. 68–71. [In Russian]
4. Sysoeva O. V., Agafonov A. E., Kirichenko P. G. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2014: sb. tr.* [Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems – 2014: collected works]. Moscow: IPPM RAN, 2014, part 3, pp. 77–80. [In Russian]
5. Tabatabai S. *Elektronnye komponenty* [Electronic components]. 2011, no. 7, pp. 10–13. [In Russian]
6. Hyung-Min Park., Jin Hyun-Bae, Kang Jin-Ku *IEICE Electronics Express*. 2010, vol. 7, no. 18, pp. 1349–1353.
7. *i.MX 6ULL Applications Processor Reference Manual, Rev. 1, 11/2017, NXP Semiconductors*.
8. Gorbunov A. S., Zinov'ev D. M., Vostokov N. G., Gorbunov Al. S. *Voprosy radioelektroniki* [Radio electronics issues]. 2018, no. 12, pp. 29–35. [In Russian]

9. Deutschmann B., Auinger B., Winkler G. *Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, 2017, EMCCompo*. 2017, no. 7998078, pp. 39–44.

Востоков Никита Глебович
инженер-программист, Научное производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

Vostokov Nikita Glebovich
part-programming engineer, Research and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

E-mail: bcsp@npp-rubin.ru

Горбунов Андрей Сергеевич
инженер-программист, Научное производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

Gorbunov Andrey Sergeevich
part-programming engineer, Research and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

E-mail: bcsp@npp-rubin.ru

Образец цитирования:

Востоков, Н. Г. Снижение электромагнитного излучения электронного устройства с помощью технологии размытия спектра / Н. Г. Востоков, А. С. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 54–64. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-6.

УДК 681.2
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-7

А. А. Федорова, М. А. Васильев, С. А. Васильев

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАЕКТОРИИ ЗАМЕРА УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ КРУГОВЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ЛАЗЕРНЫМ ПРОФИЛОГРАФОМ[1]

Аннотация.

Актуальность и цели. Предлагается математическая модель траектории замера участков поверхности почвы, выполненной лазерным профилографом методом кругового сканирования. Среди известных контактных методов измерения неровностей поверхности наибольшее распространение получил пин-метод, или профилометрирование, в то время как среди бесконтактных пользуются популярностью наземное лазерное сканирование и цифровая фотограмметрия. Предметом исследования являются процессы замера различных участков поверхности почвы. Цель работы – установление математической модели траектории замера участков поверхности почвы.

Материалы и методы. Для измерения шероховатости профиля поверхности почвы предлагается использовать лазерный профилограф для кругового сканирования. Преимуществом профилографа является высокая точность замера (±0,1 мм), которая обеспечивается лазерным датчиком. Также по сравнению с устройствами, производящими измерение в одной продольно-вертикальной плоскости, профилограф с круговым сканированием имеет габариты до 4–5 раз меньше при одной длине сканирования. При замере данных круговым сканированием в декартовой и полярной системе с началом системы в центре вращения датчика установлены системы уравнений.

Результаты. Для получения математической модели траектории замера профилографом, производящим сканирование по окружности постоянного радиуса, теоретически исследован контроль плоского горизонтального и наклонного участков поверхности. Графически зависимости представляют собой гармонические колебания, где значение амплитуды определяется величиной уклона поверхности. Расстояние по оси абсцисс между наибольшей и наименьшей точками ординаты постоянно и равно 180 град, причем по ним устанавливается направление склона с учетом начальной фазы колебаний, которая определяет значение полной фазы колебания в момент $\varphi = 0$.

Выводы. При круговом сканировании лазерным профилографом плоских горизонтальных и наклонных участков установлены круговые и эллипсоидные траектории замера соответственно. Приведено математическое и графическое описание данных в декартовой и полярной системах координат, позволяющее определить микрорельеф поверхности почвы, а также направление и уклон склона. В дальнейших исследованиях предлагается оценить траектории замера, получаемые при лазерном круговом сканировании выпуклых и вогнутых участков поверхности.

Ключевые слова: математическая модель, траектория замера, поверхность почвы, лазерный профилограф, круговое сканирование.

[1] Научные исследования выполнены в рамках гранта № МД-1198.2020.8.

© Федорова А. А., Васильев М. А., Васильев С. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

A. A. Fedorova, M. A. Vasil'ev, S. A. Vasil'ev

MATHEMATICAL MODEL OF THE MEASURING TRAJECTORY OF THE SOIL SURFACE AREAS BY CIRCULAR SCANNING WITH A LASER PROFILOGRAPH

Abstract.

Background. The scientific article offers a mathematical model of the measuring trajectory of the soil surface areas, performed by a laser Profiler using the circular scanning method. Among the known contact methods for measuring surface irregularities, the pin method or profilometry is the most common, while ground-based laser scanning and digital photogrammetry are popular among non-contact methods. The subject of the study is the process of measuring different areas of the soil surface. The purpose of this work is to establish a mathematical model of the trajectory of measuring areas of the soil surface.

Materials and methods. To measure the roughness of the soil surface profile, it is proposed to use a laser Profiler for circular scanning. The advantage of the Profiler is the high accuracy of measurement (±0.1 mm), which is provided by the laser sensor. Also, compared to devices that measure in a single longitudinal-vertical plane, the circular scan Profiler has dimensions up to 4–5 times smaller for a single scan length. Considering the process of measuring data during circular scanning in a Cartesian and polar system with the beginning of the system in the center of rotation of the sensor, systems of equations are established.

Results. To obtain a mathematical model of the trajectory of measurement by a Profiler that scans along a circle of constant radius, the control of flat horizontal and inclined sections of the surface is theoretically studied. Graphically, the dependencies represent harmonic oscillations, where the value of the amplitude is determined by the value of the slope of the surface. The distance along the abscissa axis between the largest and smallest points of the ordinate is constant and equal to 180 degrees, and the slope direction is set based on them, taking into account the initial phase of the oscillation, which determines the value of the full phase of the oscillation at the moment $\varphi = 0$.

Conclusions. For a circular scan with a laser profilograph flat horizontal and inclined sections set of circular and ellipsoidal trajectories of the measurement, respectively. Mathematical and graphical descriptions of data in Cartesian and polar coordinate systems are given, which allow determining the micro-relief of the soil surface, as well as the direction and slope of the slope. In further studies, it is proposed to evaluate the measurement trajectories obtained by laser circular scanning of convex and concave surface areas.

Keywords: mathematical model, measuring trajectory, soil surface, laser profiler, circular scan.

Введение

Для сохранения и восстановления плодородия земель сельскохозяйственного назначения и агроланшафтов ключевым моментом является изучение интенсивности эрозии почвы. Установлено, что микрорельеф почвы влияет на процессы водной эрозии, а также на распределение стока и его инфильтрацию [1, 2]. Тем не менее математическое описание микрорельефа остается плохо изученным [3].

Для количественной оценки шероховатости поверхности почв применяют различные способы и методы, позволяющие измерить микрорельеф

почвы и проанализировать экспериментальные данные. Эти методы можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные.

Среди контактных методов измерения наибольшее распространение получил пин-метод, или профилометрирование, в то время как среди бесконтактных пользуются популярностью наземное лазерное сканирование и цифровая фотограмметрия.

Пин-метры и игольчатые профилометры [4–6] по-прежнему популярны при измерении шероховатости поверхности почвы, их преимуществом является простота измерения. Недостатками данных устройств являются громоздкость, измерение профиля поверхности почвы только в одной продольно-вертикальной плоскости, а также разрушающее воздействие уголок (пинов) на почву.

Метод цифровой фотограмметрии дает возможность произвести замер большой площади поверхности как стационарно, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов [7, 8]. Недостатком метода цифровой фотограмметрии является чувствительность к солнечному свету, что требует проведение испытаний в определенных метеорологических условиях, а также данные методы трудоемки в калибровке и обработке данных.

Среди лазерных устройств можно выделить трехмерные лазерные сканеры [9, 10] и лазерные профилографы [11–13]. Недостатком метода трехмерного лазерного сканирования, как и цифровой фотограмметрии, является чувствительность к солнечному свету. Лазерные профилографы позволяют получить высокую точность измерения, но недостатком устройств [11–13] является измерение профиля поверхности почвы только в одной продольно-вертикальной плоскости.

Подводя краткий итог, следует отметить, что существует необходимость в малогабаритном, портативном, высокоточном средстве измерения с математическим описанием полученных результатов.

Материалы и методы

При измерении шероховатости профиля поверхности почвы предлагается использовать лазерный профилограф для кругового сканирования [14]. Устройство состоит из массивного основания *1* со стержнями для фиксации на поверхности почвы, на которое с помощью подшипника устанавливается ось *2*, в нижней части которой крепится угловой датчик *3*, а в верхней перпендикулярно закреплено подвижное плечо *4* с противовесом *5* с одной стороны и лазерным датчиком *6* с другой, установленного с помощью подвижного стержня *7*, что позволяет изменять начальное положение лазерного датчика *6* (рис. 1). На плече *4* установлен уровень *8*.

Лазерный датчик *3* устанавливается на определенной высоте H_0 и замеряет расстояние до поверхности почвы H_i по окружности радиусом замера R и мгновенные значения угла поворота датчика φ_i. Значения двух параметров: расстояния H_i и угла φ_i после обработки в электронном блоке сигналов *9* передаются на ноутбук *10*.

Преимуществом лазерного профилографа с круговым сканированием является высокая точность замера (±0,1 мм), которая обеспечивается лазерным датчиком РФ605-105/500 [15]. Также по сравнению с устройствами,

производящими измерение в одной продольно-вертикальной плоскости, профилограф с круговым сканированием имеет габариты до 4–5 раз меньше при одной длине сканирования.

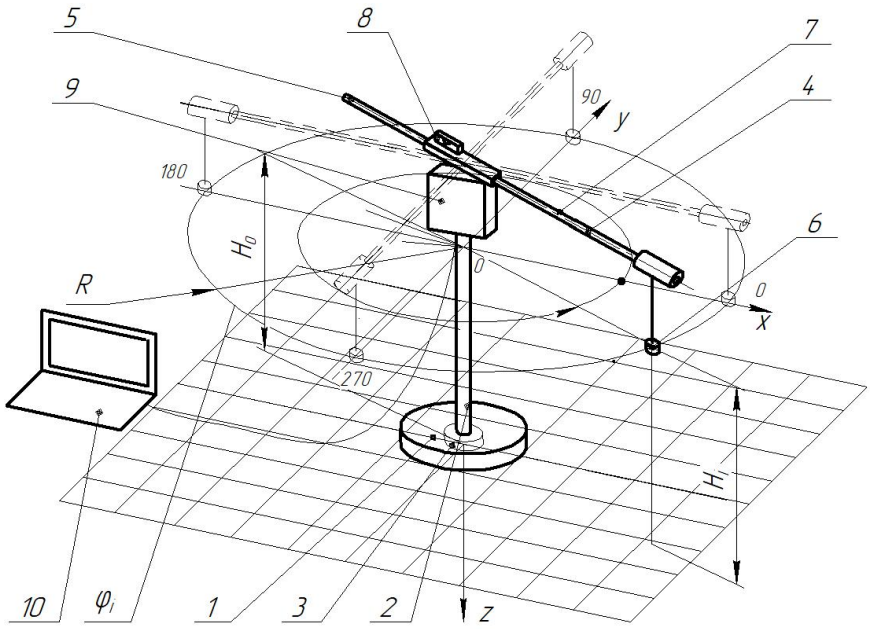


Рис. 1. Модель профилографа

Для оценки данных при круговом сканировании в декартовой и полярной системе за начало системы принят центр вращения датчика *6*. Направление осей декартовой системы координат принято в зависимости от угла поворота лазерного датчика φ_i согласно рис. 1.

Траектория движения датчика расположена в горизонтальной плоскости и представляет собой окружность радиусом замера *R*, которая задается в декартовой системе координат уравнением

$$\begin{cases} R^2 = x_i^2 + y_i^2, \\ z_i = H_i = 0, \end{cases} \tag{1}$$

где *R* – радиус перемещения датчика, м; x_i, y_i, z_i – значения абсциссы, ординаты и аппликаты точки датчика в *i*-м положении, м; H_i – значение расстояния до поверхности почвы, м.

В полярных координатах уравнение окружности примет вид

$$\begin{cases} \rho = R, \\ 0 < \varphi_i < 360°, \\ z_i = H_i = 0, \end{cases} \tag{2}$$

где ρ – радиус перемещения датчика в *i*-м положении, м; φ_i – угол поворота датчика в *i*-м положении, град.

Координаты x_i, y_i связаны с углом φ_i в полярных координатах формулами:

$$\begin{cases} x_i = R\cos\varphi_i, \\ y_i = R\sin\varphi_i. \end{cases} \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

В зависимости от формы рельефа замеряемых участков образуются различные траектории, получаемые пересечением цилиндрической поверхности радиусом замера *R*, образуемого полным оборотом датчика в текущем положении, и поверхностью замеряемого участка (далее – траектории замера).

Для получения математической модели траектории замера профилографом, производящим сканирование по окружности радиусом *R*, рассмотрим контроль плоского горизонтального и наклонного участков поверхности.

Представим траекторию замера на плоском горизонтальном участке (рис. 2), геометрически представляющем собой горизонтальную плоскость, смещенную относительно плоскости вращения датчика *3* на расстояние H_0 по вертикали.

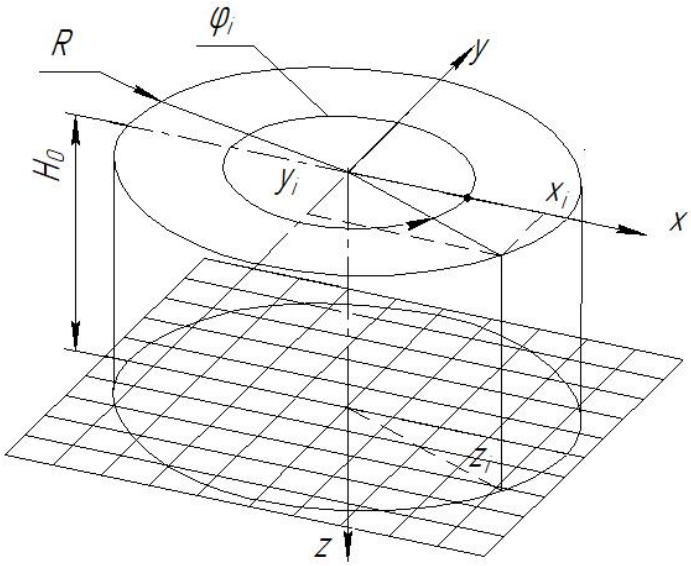


Рис. 2. Траектория замера плоского горизонтального участка

Траектория замера, образуемая пересечением цилиндрической поверхности радиусом замера R с горизонтальной плоскостью, будет представлять собой окружность, которая в декартовой системе координат задается уравнениями:

$$\begin{cases} R^2 = x_i^2 + y_i^2, \\ z_i = H_i = H_0. \end{cases} \quad (4)$$

В полярных координатах уравнение окружности имеет вид

$$\begin{cases} \rho = R, \\ 0 < \varphi_i < 360°, \\ z_i = H_i = H_0. \end{cases} \quad (5)$$

При рассмотрении на плоском наклонном участке траектория замера будет следующей (рис. 3).

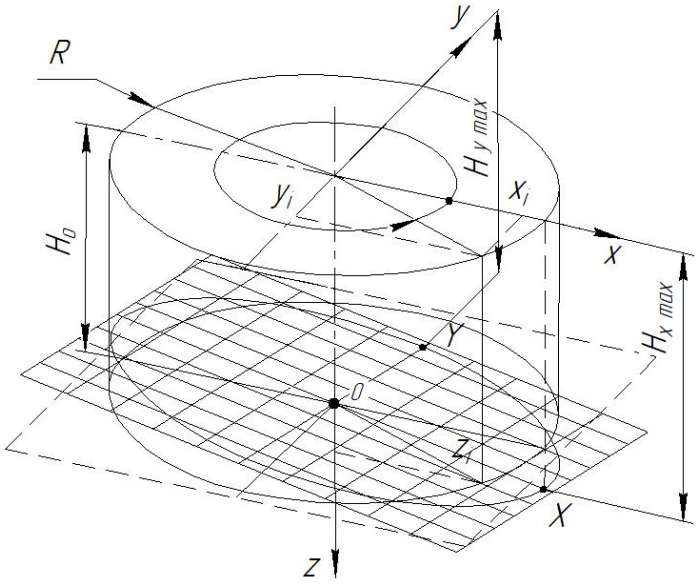


Рис. 3. Траектория замера на плоском склоне

Плоский склон представляет собой плоскую наклонную поверхность, размещенную под некоторым углом к горизонтальной плоскости, уравнение которой имеет вид

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (6)$$

где a, b, c, d – постоянные коэффициенты.

Коэффициенты a, b, c, d наклонной плоскости определены через три точки плоскости: $O(0;0;H_0)$, $X(R;0;H_{x\max} - H_0)$ и $Y(0;R;H_{y\max} - H_0)$, где $H_{x\max}$ – максимальное расстояние от лазерного датчика до поверхности почвы по оси x, м; $H_{y\max}$ – максимальное расстояние от лазерного датчика до поверхности почвы по оси y, м; H_0 – высота установки лазерного датчика от поверхности почвы, м.

Тогда система уравнений для поверхности может быть задана следующим образом:

$$\begin{cases} d = -H_0 c, \\ Ra + (H_{x\max} - H_0)c + d = 0, \\ Rb + (H_{y\max} - H_0)c + d = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициенты a, b и d выражены через c из системы уравнений (7):

$$\begin{cases} d = -H_0 c, \\ a = -\dfrac{(H_{x\max} - H_0)c}{R}, \\ b = -\dfrac{(H_{y\max} - H_0)c}{R}. \end{cases} \quad (8)$$

Подставив значения коэффициентов a, b и d из системы уравнений (8) в (4) и сократив коэффициент c, получим уравнение для нахождения координаты z:

$$z_i = \frac{(H_{x\max} - H_0)}{R} x_i + \frac{(H_{y\max} - H_0)}{R} y_i + H_0. \quad (9)$$

Тогда окончательно траекторию, образуемую пересечением наклонной плоскости с цилиндрической поверхностью радиусом замера R, можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{cases} R^2 = x_i^2 + y_i^2, \\ z_i = H_i = \dfrac{(H_{x\max} - H_0)}{R} x_i + \dfrac{(H_{y\max} - H_0)}{R} y_i + H_0. \end{cases} \quad (10)$$

Коэффициенты перед координатами x_i и y_i представляют собой уклоны по осям x и y соответственно.

С учетом уравнения (3) в полярных координатах система уравнений (10) предстанет в виде

$$\begin{cases} \rho = R, \\ 0 < \varphi_i < 360°, \\ z_i = H_i = (H_{x\max} - H_0)\cos\varphi_i + (H_{y\max} - H_0)\sin\varphi_i + H_0. \end{cases} \quad (11)$$

Для определения уклона плоского склона i необходимо определить наибольшее расстояние $H_{\max}$ на радиусе замера R:

$$i = \frac{H_{\max} - H_0}{R}, \quad (12)$$

где i – уклон плоского склона; $H_{\max}$ – максимальное расстояние от датчика до поверхности почвы, м.

Для определения типа линии, образуемой пересечением наклонной плоскости с цилиндрической поверхностью радиусом замера R, рассмотрен участок траектории замера в системе координат (x_i', y_i') на наклонной плоскости (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что

$$\begin{cases} x_i = x_i' \cos\alpha_i, \\ y_i = y_i' \cos\beta_i, \end{cases} \quad (13)$$

где x'_i, y'_i – значения абсциссы и ординаты точки траектории в i-м положении, м.

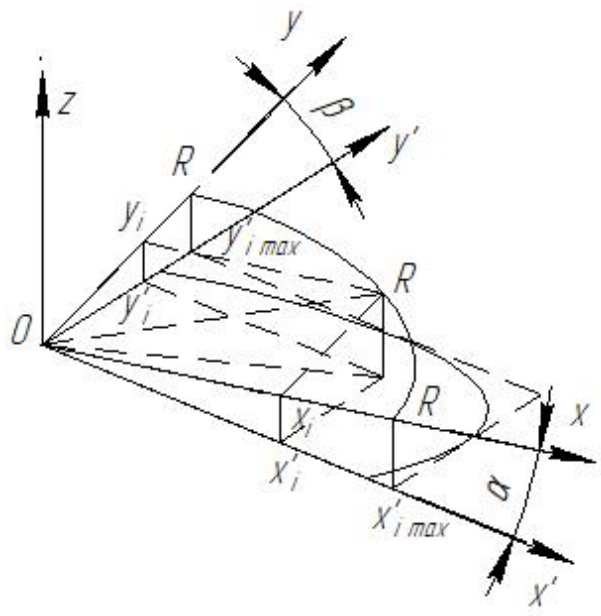


Рис. 4. Участок траектории замера на наклонной плоскости

Тогда первая часть системы уравнений (10) предстанет в виде

$$R^2 = (x'_i \cos\alpha)^2 + (y'_i \cos\beta)^2. \tag{14}$$

Поделив уравнение (13) на R^2, получим выражение

$$1 = (x'_i \cos\alpha)^2 / R^2 + (y'_i \cos\beta)^2 / R^2. \tag{15}$$

По осям x' и y' радиус R можно представить как

$$\begin{cases} R = x'_{i\max} \cos\alpha_i, \\ R = y'_{i\max} \cos\beta_i, \end{cases} \tag{16}$$

где $x'_{i\max}, y'_{i\max}$ – максимальные значения абсциссы и ординаты точки траектории в i-м положении, м.

Подставив значения R из уравнений (16) в уравнение (15), получим уравнение траектории замера:

$$1 = \frac{(x'_i \cos\alpha)^2}{(x'_{i\max} \cos\alpha)^2} + \frac{(y'_i \cos\beta)^2}{(y'_{i\max} \cos\beta)^2} = x'^2_i / x'^2_{i\max} + y'^2_i / y'^2_{i\max}. \tag{17}$$

Уравнение (17) показывает, что траектория замера, образуемая пересечением цилиндрической поверхности радиусом замера R с наклонной плоскостью, представляет собой эллипс.

На рис. 5 показаны графическое отображение уравнений зависимости расстояния H_i от координат x_i и y_i (10) и от угла φ_i (11) при различных значениях $H_{x\max}$ и $H_{y\max}$.

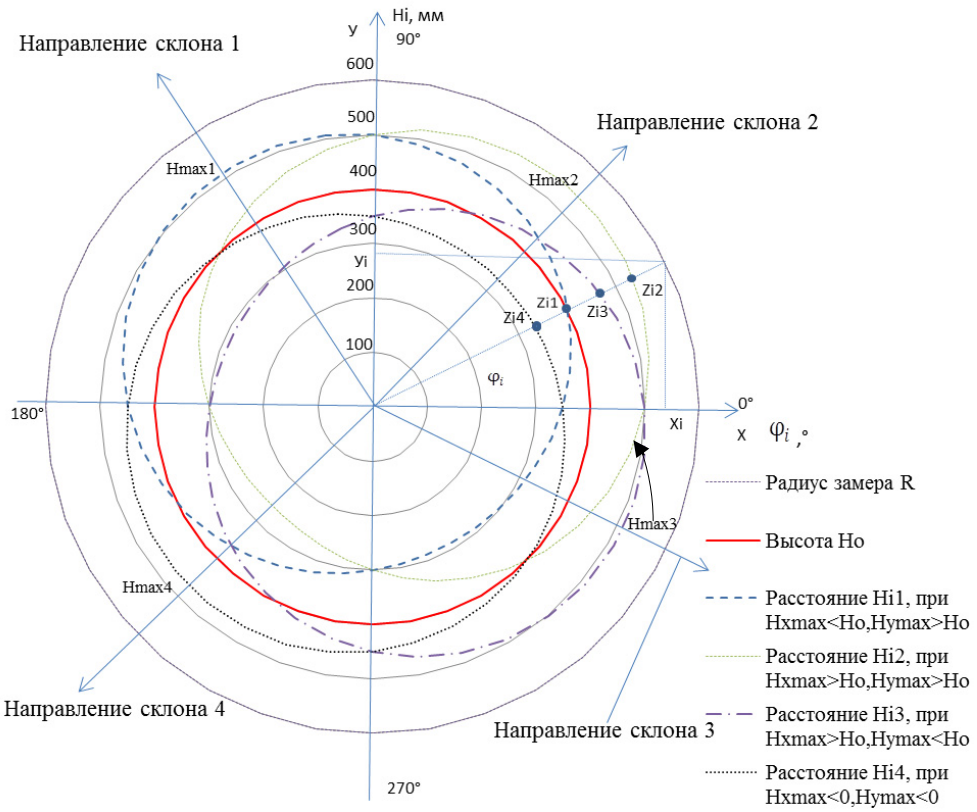


Рис. 5. Круговые диаграммы зависимости расстояния H_i от координат x_i и y_i и от угла φ_i

На круговых диаграммах (рис. 5) показано произвольное *i*-е положение датчика с углом поворота φ_i и соответствующими координатами x_i и y_i радиусом *R*. Координаты z_i (расстояния H_i определяются пересечением линий под углом φ_i с соответствующей траекторией. По максимальным расстояниям от лазерного датчика до поверхности почвы $H_{\max}$ траекторий определены направления плоских склонов.

На рис. 6 показаны развернутые графики зависимости расстояния H_i от угла φ_i при различных значениях $H_{x\max}$ и $H_{y\max}$.

При рассмотрении графиков зависимости расстояния H_i от угла φ_i по рис. 6 можно отметить, что графически зависимости представляют собой гармонические колебания, где значение амплитуды определяется величиной уклона поверхности. Расстояние по оси абсцисс между наибольшей и

наименьшей точками ординаты постоянно и равно 180 град, причем по ним устанавливается направление склона с учетом начальной фазы колебаний, которая определяет значение полной фазы колебания (и самой величины H) в момент $\varphi = 0$.

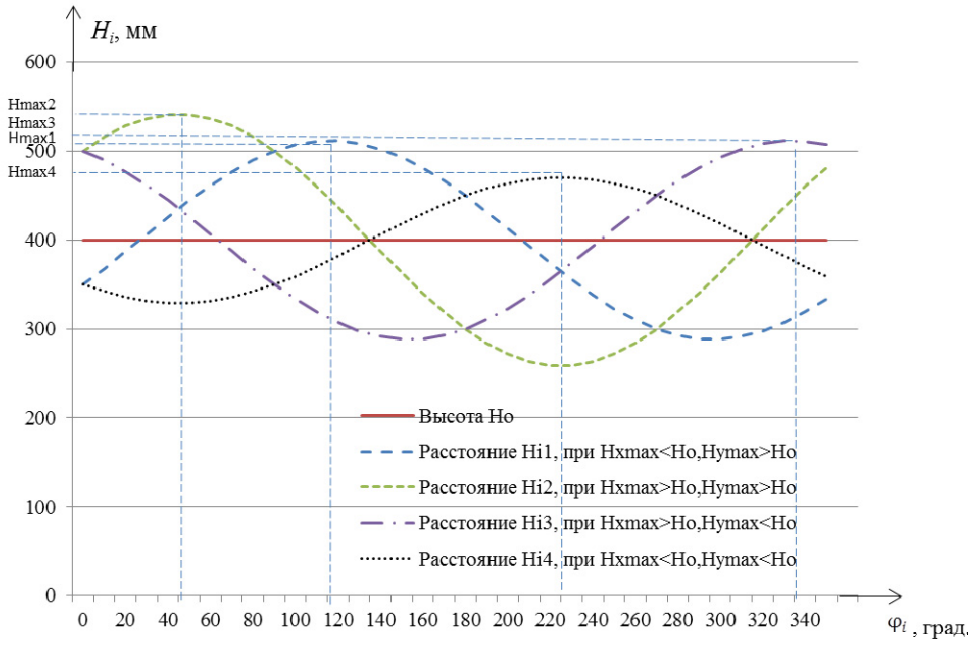


Рис. 6. Графики зависимости расстояния H_i от угла φ_i

Заключение

При круговом сканировании лазерным профилографом плоских горизонтальных и наклонных участков получены круговые и эллипсоидные траектории замера соответственно. Приведено математическое и графическое описание данных в декартовой и полярной системах координат, позволяющее определить микрорельеф поверхности почвы, а также направление и уклон склона. В дальнейших исследованиях предлагается оценить траектории замера, получаемые при лазерном круговом сканировании выпуклых и вогнутых участков поверхности.

Библиографический список

1. **Калужский, В. А.** Комплекс агролесомелиоративных мероприятий и его воздействие на сток и водную эрозию почв на Приволжской возвышенности : автореф. дис. … канд. с-х. наук / Калужский В. А. – Саратов, 1970. – 21 с.
2. **Нестеренко, Ю. М.** Влияние рельефа на режим влаги почв сельскохозяйственных угодий Южного Урала / Ю. М. Нестеренко // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 4 (78). – С. 15–18.
3. **Захарченко, А. В.** Экологические проблемы формализации топологоморфологических поверхностей трехмерной почв / А. В. Захарченко // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2005. – № 7. – С. 109–115.

4. Аннотированный сборник средств измерения и испытательного оборудования. – Новокубанск : ФГНУ «РосНИИТиМ», 2012. – 51 с.
5. Performance of two measurement methods of pin meter and laser disto meter in the measurement of microtopography / S. Afrasyabi, M. Tazeh, R. T. Mehrjardi, M. J. Ghaneibafghi, S. Kalantari // Desert EcosystemEngineering Journal. – 2019. – Vol. 8 (22). – P. 1–14.
6. **Mariana, C.** Methodology evaluation of pin microrelief meter / C. Mariana, F. Melo Laene, F. Tavares Thaísa, R. Oliveira Rodrigo // Eng. Agríc. – 2017. – Vol. 37 (5). – P. 1056–1061.
7. **Bemis, S. P.** Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and palaeoseismology / S. P. Bemis, S. Micklethwaite, D. Turner // Journal of Structural Geology. – 2014. – Vol. 69. – P. 163–178.
8. **Marx, L. N.** Use of Air-Based Photogrammetry for Soil Erosion Assessment / L. N. Marx, B. M. Silva, J. N. Cândido, R. J. Michael // Conference: TERRAenVISION, 2019. – DOI 10.3390/proceedings2019030005.
9. **Hu, Y.** Assessment of crusting effects on interrill erosion by laser scanning / Y. Hu, W. Fister, Y. He, N. J. Kuhn // PeerJ. – 2020. – Vol. 8. – P. e8487. – URL: https://doi.org/10.7717/peerj.8487
10. **Huff, T. P.** Understanding Lateral Marsh Edge Erosion with Terrestrial Laser Scanning (TLS) / T. P. Huff, R. A. Feagin, A. Delgado // Remote Sens. – 2019. – Vol. 11 (19). – P. 2208. – URL: https://doi.org/10.3390/rs11192208.
11. **Polyakov, V. M.** Simple Automated Laser Profile Meter / V. M. Polyakov, A. Nearing // Soil Science Society of America journal. – 2019. – Vol. 83, iss. 2. – P. 327–331.
12. **Киреев, И. М.** Измерение микрорельефа почвы бесконтактным методом / И. М. Киреев // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 2. – С. 18–21.
13. **Bertuzzi, P.** Measuring In-Situ Soil Surface Roughness Using a Laser Profilometer / P. Bertuzzi & J. M. Caussignac // Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, European Space Agency. – 1988. – P. 19.
14. **Васильев, С. А.** Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах / С. А. Васильев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 3 (43). – С. 220–226.
15. **Васильев, С. А.** Разработка методов и технических средств контроля противоэрозионных технологий на склоновых агроландшафтах : дис. ... д-ра техн. наук / Васильев С. А. – Москва, 2017. – 345 с.

References

1. Kaluzhskij V. A. *Kompleks agrolesomeliorativnyh meroprijatija i ego vozdejstvie na stok i vodnuju jeroziju pochv na Privolzhskoj vozvyshennosti: avtoref. dis. kand. s-h. nauk* [A complex of agroforestry and its impact on runoff and water erosion of soils in the Volga Upland: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of agricultural sciences]. Saratov, 1970, 21 p. [In Russian]
2. Nesterenko Yu. M. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of Orenburg State Agrarian University]. 2019, no. 4 (78), pp. 15–18. [In Russian]
3. Zakharchenko A. V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State Pedagogical University]. 2005, no. 7, pp. 109–115. [In Russian]
4. *Annotirovannyy sbornik sredstv izmereniya i ispytatel'nogo oborudovaniya* [Annotated collection of measuring instruments and test equipment]. Novokubansk: FGNU «RosNIITiM», 2012, 51 p. [In Russian]

5. Afrasyabi S., Tazeh M., Mehrjardi R. T., Ghaneibafghi M. J., Kalantari S. *Desert EcosystemEngineering Journal*. 2019, vol. 8 (22), pp. 1–14.
6. Mariana C., Melo Laene F., Tavares Thaísa F., Oliveira Rodrigo R. *Eng. Agríc*. 2017, vol. 37 (5), pp. 1056–1061.
7. Bemis S. P., Micklethwaite S., Turner D. *Journal of Structural Geology*. 2014, vol. 69, pp. 163–178.
8. Marx L. N., Silva B. M., Cândido J. N., Michael R. J. *Conference: TERRAenVISION, 2019*. DOI 10.3390/proceedings2019030005.
9. Hu Y., Fister W., He Y., Kuhn N. J. *PeerJ*. 2020, vol. 8, R. e8487. Available at: https://doi.org/10.7717/peerj.8487
10. Huff T. P., Feagin R. A., Delgado A. *Remote Sens*. 2019, vol. 11 (19), p. 2208. Available at: https://doi.org/10.3390/rs11192208.
11. Polyakov V. M., Nearing A. *Soil Science Society of America journal*. 2019, vol. 83, iss. 2, pp. 327–331.
12. Kireev I. M. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for village]. 2017, no. 2, pp. 18–21. [In Russian]
13. Bertuzzi P., Caussignac J. M. *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, European Space Agency*. 1988, p. 19.
14. Vasil'ev S. A. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzhsky agro-university complex: science and higher professional education]. 2016, no. 3 (43), pp. 220–226. [In Russian]
15. Vasil'ev S. A. *Razrabotka metodov i tekhnicheskikh sredstv kontrolya protivoerozionnykh tekhnologiy na sklonovykh agrolandshaftakh: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of methods and technical means of control of anti-erosion technologies on slope agricultural landscapes: dissertation to apply for the degree of the doctor engineering of medical sciences]. Moscow, 2017, 345 p. [In Russian]

Федорова Алена Анатольевна
соискатель, кафедра прикладной механики и графики, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова (Россия, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

Fedorova Alena Anatol'evna
Applicant, sub-department of applied mechanics and graphics, Chuvash State University named after I. N. Ulyanova (15 Moskovsky avenue, Cheboksary, Russia)

E-mail: e_a_a@mail.ru

Васильев Михаил Андриянович
соискатель, кафедра прикладной механики и графики, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова (Россия, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

Vasil'ev Mikhail Andriyanovich
Applicant, sub-department of applied mechanics and graphics, Chuvash State University named after I. N. Ulyanova (15 Moskovsky avenue, Cheboksary, Russia)

E-mail: mishawasilev@mail.ru

Васильев Сергей Анатольевич
доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной механики и графики, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова (Россия, г. Чебоксары, Московский проспект, 15)

Vasil'ev Sergey Anatol'evich
Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of applied mechanics and graphics, Chuvash State University named after I. N. Ulyanova (15 Moskovsky avenue, Cheboksary, Russia)

E-mail: Vsa_21@mail.ru

Образец цитирования:

Федорова, А. А. Математическая модель траектории замера участков поверхности почвы круговым сканированием лазерным профилографом / А. А. Федорова, М. А. Васильев, С. А. Васильев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 65–77. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-7.

УДК 621.373.826, 629.783, 621.384.3
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-8

Е. А. Щелоков

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Современные методы преобразования параметров движения микрометеороидов совершенствуются в направлении бесконтактного получения информации взамен регистрации путем взаимодействия с мишенью. Цель статьи – продемонстрировать возможность создания преобразователей параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем с точностью измерений не хуже реализованных контактных методов.

Материалы и методы. Предлагаются новые методы реализации устройств, основанные на бесконтактном исследовании параметров движения объектов, а также анализируется их погрешность и достоверность измерений.

Результаты. Показано, что при различных характеристиках выбранных радиоэлементов и геометрических параметров устройства можно варьировать необходимыми значениями погрешностей измерений и вероятностью получения информации.

Выводы. Предложен метод уменьшения погрешности измерений, вносимый методической погрешностью, за счет введения дополнительных элементов в предлагаемое устройство.

Ключевые слова: микрометеороид, погрешность измерений, достоверность, бесконтактные методы.

E. A. Shchelokov

A METHOD OF MEASUREMENT PRECISION AND INDEX VALIDITY IMPROVEMENT FOR AN OPTOELECTRONIC CONVERTER OF MICROMETEOROIDS MOTION PARAMETERS

Abstract.

Background. Modern methods of converting the motion parameters of micrometeoroids move in the direction of non-contact information acquisition, instead of recording by interacting with the target. The purpose of the article is to demonstrate the possibility of creating converters of motion parameters of micrometeoroids based on optical systems with measurement accuracy no worse than implemented contact methods.

Materials and methods. New methods are proposed for the implementation of devices, based on a contactless study of the parameters of motion of objects, and their error and measurement reliability are analyzed.

Results. Article is shown that for various characteristics of the selected radio elements and geometric parameters of the device, it is possible to vary the necessary values of the measurement errors and the probability of obtaining information.

© Щелоков Е. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Conclusion. A method for reducing the measurement error introduced by the methodological error due to the introduction of additional elements in the proposed device is proposed.

Keywords: micrometeoroid, measurement inaccuracy, reliability, contactless methods.

Введение

В работе авторов [1] была построена математическая модель движения микрометеороидов при пересечении «световых плоскостей» с рядом допущений:

1) отсутствует факт влияния свойства переотражения лазерного излучения от различных типов поверхности;

2) не рассмотрены возможные погрешности в полученных результатах измерения.

Рассмотрим случай, когда устройство основано на переотражениях лазерного луча от зеркальных поверхностей, при котором частицы одновременно пролетают через «световую плоскость» (плоскость, которая образуется в результате многократного переотражения лазерного луча от двух параллельных зеркальных поверхностей (рис. 1)), но одна пролетает в начале хода луча (до первого переотражения), а вторая – в конце хода луча (после последнего переотражения, перед попаданием на светочувствительный элемент).

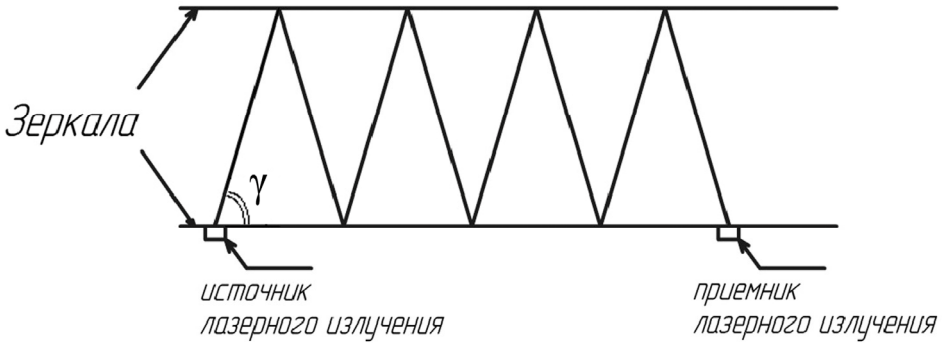


Рис. 1. Траектория движения лазерного луча

Получаем, что факт пролета через «световую плоскость» частицы, переместившейся возле светочувствительного элемента, будет зафиксирован достоверно. При этом частица, пролетевшая в начале хода луча, будет зафиксирована только после пропадания сигнала на светочувствительном элементе, а значит, будет зависеть от расстояния, которое пройдено лучом до момента его приема фотодиодом. В рассматриваемом случае время, пройденное лучом до фиксации факта пролета частицы, будет определяться следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\frac{h}{\sin(\gamma)} n}{c}, \qquad (1)$$

где Δt – измеряемое время; H – расстояние между зеркалами; γ – начальный угол хода луча; n – количество переотражений; c – скорость света.

В качестве примера вносимой погрешности для удобства расчетов примем $\gamma = 89{,}9\ °$, количество переотражений 100, а расстояние между зеркальными поверхностями 0,1 м. В приведенном случае, подставив значения в (1), получим отклонение во времени измерений факта пролета частицы в $\Delta t \approx 33$ нс (что превышает на три порядка необходимое значение быстродействия, указанное в [2]). То есть сам метод ограничивает возможности получения информации о направлении движения и скорости, но допускает анализ фактов пролета частицы с незначительным временем отклонения.

Рассмотрим случай, когда устройство основано на сочетании светодиодных и фотодиодных матриц, при котором частицы одновременно пролетают через «световую плоскость», но одна пролетает в начале хода луча (в непосредственной близости к светодиодам), а вторая – в конце хода луча (перед попаданием на светочувствительный элемент).

Получаем, что частица, пролетевшая возле светочувствительного элемента, будет зафиксирована достоверно. При этом частица, пролетевшая в начале хода луча, будет зафиксирована только после пропадания сигнала на светочувствительном элементе, а значит, будет зависть от расстояния, которое пройдено лучом до момента его попадания на чувствительный элемент. В рассматриваемом случае время, пройденное лучом до получения факта пролета частицы, будет определяться как

$$\Delta t = \frac{H}{c}. \tag{2}$$

Введем допущение, что расстояние между излучателем и приемником $H = 0{,}1$ м. В приведенном случае, подставив значение в (2), получим максимальное отклонение во времени измерений факта пролета частицы в $\Delta t \approx 330$ пс. В сравнении с предыдущим методом погрешность ниже, однако она все так же не позволяет достоверно получать информацию о параметрах движения микрометеороидов.

В обоих случаях получаем невозможность измерения скорости и направления движения, т.е. невозможность реализации поставленной задачи.

1. Методы увеличения точности измерений

Для увеличения точности измерений можно воспользоваться следующими вариантами исполнения устройства:

1. Для увеличения точности измерений времени преобразования методом переотражения от зеркальных поверхностей достаточно установить дополнительную «световую плоскость», отличающуюся направлением движения лазера. В таком случае можно получить систему из двух уравнений, исходя из которых легко получить достоверное значение времени пересечения световой плоскости исследуемым объектом:

$$T1 = t + \frac{\frac{H}{\sin(\gamma)} n_1}{c}; \tag{3}$$

$$T2 = t + \frac{\frac{H}{\sin(\gamma)}(n - n_1)}{c}. \quad (4)$$

где n_1 – количество переотражений в одной «световой плоскости»; t – действительное время пролета частицы; $T1$, $T2$ – время пролета объекта, полученное устройством.

Решая систему уравнений (3), (4) с двумя неизвестными, получаем

$$T2 = \frac{T2 + T1 - \frac{nH}{c \cdot \sin(\gamma)}}{2}. \quad (5)$$

2. Для увеличения точности измерений времени фиксации факта пролета объекта методом, основанным на светодиодных-фотодиодных матрицах, достаточно установить дополнительную «световую плоскость», отличающуюся направлением излучения (противонаправлено первоначальной «световой плоскости». В таком случае будут получены два результата измерения:

$$T1 = t + \frac{l}{c}; \quad (6)$$

$$T2 = t + \frac{H - l}{c}, \quad (7)$$

где l – расстояние, на котором пролетела частица до первой плоскости.

Решая систему уравнений (6), (7) с двумя неизвестными, получаем

$$t = \frac{T2 + T1 - \frac{H}{c}}{2}. \quad (8)$$

Как видно, для обоих методов (уравнения (5), (8)) существует возможность устранить влияние погрешности метода, однако при этом усложняется конструкция устройства.

2. Инструментальная погрешность

Устранив влияние методической погрешности, введя дополнительные элементы в устройства, мы увеличиваем неточность измерений. Данная неточность связана с инструментальной погрешностью, которая зависит от быстродействия каждого элемента предлагаемого устройства.

Таким образом, проведя анализ современных вычислительных устройств и других элементов устройства, которые могут привести к инструментальной погрешности, получили результаты, приведенные в табл. 1 (в данной таблице приведены наиболее подходящие радиоэлементы для устройства, обеспечивающие максимальное быстродействие).

Как видно из табл. 1, наибольшую погрешность вносит светочувствительный элемент (фотодиод). Поскольку его быстродействие составляет 100 пс, соответственно вносимая погрешность будет определяться внесением соответствующей погрешности в каждое измерение в размере 200 пс, что

необходимо учитывать при получении каждой временной отметки факта пролета объекта. Так как быстродействие компаратора выше быстродействия фотодиода, его можно не учитывать.

Таблица 1

Быстродействие радиоэлектронных компонентов

Наименование	Производитель	Быстродействие	Источник
Процессор «Эльбрус-8С»	Объединенная приборостроительная корпорация (Россия)	4 пс	[3]
Фотодиод PD24-005-HS	ООО «АИБИ» (Россия)	100 пс	[4]
Компаратор HMC675LP3E	Analog device	85 пс	[5]

Дополнительно вносится погрешность обработки микропроцессором, которая составляет 4 пс за такт, что составляет 2 % от необходимого быстродействия для получения времени факта пролета частиц размером 10 мкм (в соответствии с поставленной целью в [2]). Данную погрешность необходимо учитывать в результатах измерений.

Однако учитывая возможную деградацию компонентов, невозможно учесть случайные погрешности, которые будут возникать со временем. Данную погрешность невозможно отразить в результатах измерений.

3. Вероятность обнаружения исследуемых объектов

Поскольку заранее такие параметры, как функция корреляции и плотность распределения вероятности, неизвестны, то оценка вероятности пролета микрометеороида непосредственно через элемент «световой плоскости» может быть получена лишь после проведения измерений опытным путем. Для предварительной оценки необходимого числа отсчетов можно допустить, что исследуемые объекты пролетают через устройство со случайными координатами пересечения плоскостей устройства. Для таких объектов плотность распределения определена методом статистических испытаний Монте-Карло путем компьютерного моделирования процесса измерений.

Для каждого из углов первоначального положения лазера γ было построено множество моделей (для измерений от 10 до 10000 точек), в каждом из которых вычислялось количество попаданий частицы непосредственно в элемент «световой плоскости» относительно частиц, попавших в плоскость устройства (N). Приняв допущение, что вероятность обнаружения объекта одинакова для каждого звена «световой плоскости», получим следующие условия:

$$y(x)=\begin{cases} x\cdot\tan(\gamma),\ 0<x<\dfrac{h}{\tan(\gamma)}, \\ 2h-x\cdot\tan(\gamma),\ \dfrac{h}{\tan(\gamma)}<x<2\dfrac{h}{\tan(\gamma)}, \end{cases} \tag{9}$$

где h – расстояние между зеркалами; γ – начальный угол наклона лазерного излучения; x, y – координаты пересечения «световой плоскости».

На рис. 2 изображен фрагмент полученной световой плоскости для ($y = \arctan\left(\frac{h}{5 \cdot 10^{-6}}\right)$ и $h = 0{,}1$).

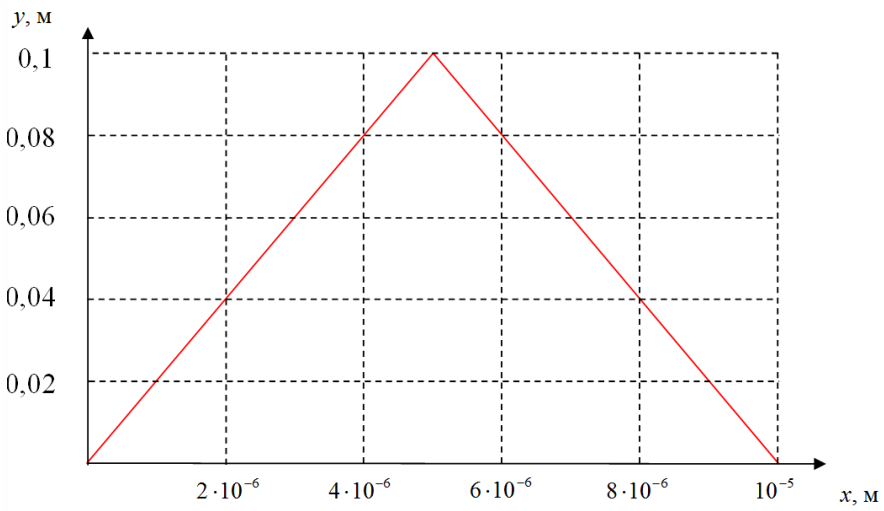


Рис. 2. Фрагмент световой плоскости в увеличенном размере

По соответствующему алгоритму был задан массив из множества точек (от 10 до 10000) в различных случайных координатах, а также сопоставлено уравнение кривой «световой плоскости» и положения полученных точек с учетом того, что пересечением считалось положение точек, соответствующее действительному значению с допускаемым отклонением в половину размера исследуемого объекта (5 мкм).

В результате из полученных случайным образом координат точек был сформирован график и получены значения вероятности соответствия факта пролета частицы и факта ее регистрации для различных значений первоначального угла положения лазера (рис. 3).

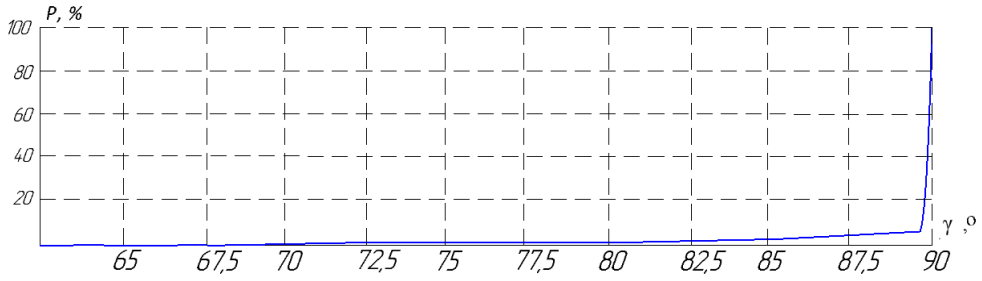
Заключение

Исследованы различные виды погрешностей, оказывающие влияние на результаты измерений оптоэлектронными преобразователями параметров движения микрометеороидов.

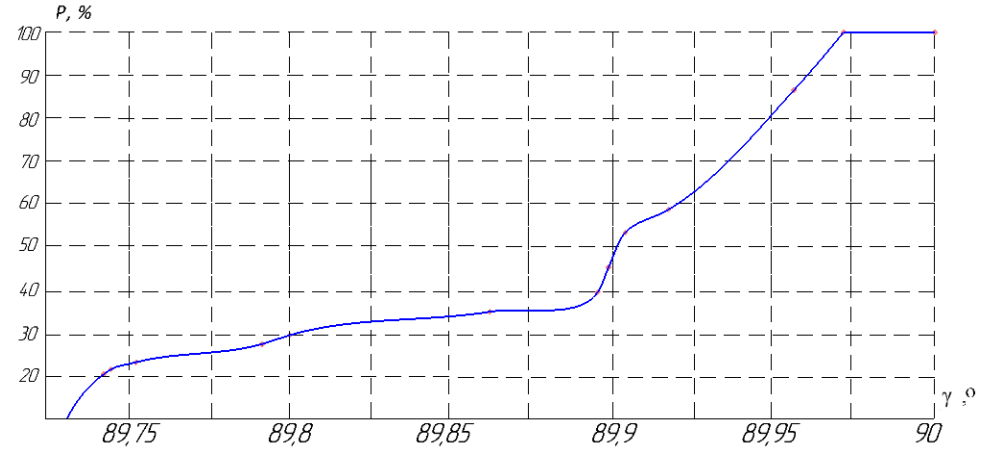
Предложен метод, позволяющий устранить методическую погрешность.

Рассмотрена и предложена современная электронная компонентная база, позволяющая достигнуть наибольшего быстродействия оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов, позволяющая достичь инструментальной погрешности в 2 %.

Показано, что при различном значении угла наклона лазера вероятность достоверной регистрации факта пролета объекта варьируется (при этом произведен расчет необходимого угла для получения 100 % вероятности обнаружения объектов размером более 10 мкм и получено значение 89,97136°).



а)



б)

Рис. 3. График зависимости вероятности фиксации факта пролета исследуемого объекта через «световую плоскость»:
а – для значений углов менее 89°; ***б*** – для значения углов, близких к 90°

Библиографический список

1. **Щелоков, Е. А.** Метод и устройство для оценивания параметров движения микрометеороидов на основе оптических систем / Е. А. Щелоков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 56. – С. 131–135.
2. **Щелоков, Е. А.** Бесконтактное определение параметров движения микрометеороидов на основе лазерных систем / Е. А. Щелоков, А. А Кулешова // Наукоемкие технологии. – 2017. – № 6.– С. 28–31.
3. Tadviser.ru. Эльбрус-8С / МЦСТ. – URL: http://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Эльбрус-8С (дата обращения: 05.04.2020).
4. ООО «АИБИ», Быстродействующий фотодиод PD24-005-HS / ООО «АИБИ».– URL: http://www.ibsg.ru/PDF_Data/PD24-005-HS_RU.pdf (дата обращения: 05.04.2020).
5. Analog Devices, Быстродействующие компараторы (Задержка распространения <100 нс) / Analog Devices. – URL: https://www.analog.com/ru/products/analog-functions/comparators/high-speed-comparators-lessthan-100ns-propagation-delay.html (дата обращения: 05.04.2020).

References

1. Shhelokov E. A. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University]. 2016, no. 56, pp. 131–135. [In Russian]

2. Shhelokov E. A., Kuleshova A. A. *Naukoemkie tehnologii* [Science intensive technologies]. 2017, no. 6, pp. 28–31. [In Russian]
3. *Tadviser.ru. Jel'brus-8S.* MCST. Available at: http://www.tadviser.ru/index.php/Produkt:Jel'brus-8S (accessed 05.04.2020).
4. *OOO «AIBI», Bystrodejstvujushhij fotodiod PD24-005-HS* [LLC "AIBI", High-speed photodiode PD24-005-HS]. OOO «AIBI». Available at: http://www.ibsg.ru/PDF_Data/PD24-005-HS_RU.pdf (accessed 05.04.2020). [In Russian]
5. *Analog Devices, Bystrodejstvujushhie komparatory (Zaderzhka rasprostranenija <100 ns)* [Analog Devices, High-speed comparators (Propagation delay <100ns]. Analog Devices. Available at: https://www.analog.com/ru/products/analog-functions/comparators/high-speed-comparators-lessthan-100ns-propagation-delay.html (accessed 05.04.2020). [In Russian]

Щелоков Евгений Алексеевич
аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева (Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34)

Shchelokov Evgeniy Alekseevich
Postgraduate student, Samara National Research University (34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

E-mail: Riddick41666@mail.ru

Образец цитирования:

Щелоков, Е. А. Метод повышения точности измерений и показателей достоверности измерений оптоэлектронного преобразователя параметров движения микрометеороидов / Е. А. Щелоков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 78–85. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-8.

УДК 621.775.26
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-9

В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко, П. А. Алыпов, В. А. Лебедев

МЕЛЮЩИЕ ШАРЫ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Аннотация.

Актуальность и цели. На настоящем этапе в промышленных условиях возможно получение мелющих шаров, изготовленных способом поперечно-винтовой прокатки с повышенной точностью их геометрии. Актуальным является разделение номенклатуры производимых мелющих шаров на две группы геометрической точности с дальнейшим требованием «повышенной точности» к шарам, предназначенным для термической обработки на пятую группу твердости. Объектом исследования являются мелющие шары. Предметом исследования является процесс их производства на современном оборудовании с достижением высоких геометрических параметров. Цель работы – структурирование параметров, от которых зависит точность геометрических размеров произведенных мелющих шаров, определение степени их влияния, а также предельных отклонений для предлагаемой группы шаров повышенной точности.

Материалы и методы. Исследование выполнено в условиях рельсобалочного цеха АО «ЕВРАЗ-НТМК». Прокатка мелющих шаров производилась на современном стане 60-120. Изготовление валков с непрерывно-изменяющимся шагом производилось на 5-координатном обрабатывающем центре NORMA L-45, а контроль геометрических параметров – на измерительной машине FAROARM.

Результаты. Для выявления основных факторов, влияющих на геометрическую точность мелющих шаров, были выделены следующие погрешности: погрешность, обусловленная качеством изготовления инструмента деформации, погрешность настройки стана и погрешность измерений. Произведен расчет суммарной погрешности при выполнении ряда условий для всех размеров получаемых шаров и составлена таблица с разделением мелющих шаров на две группы: обыкновенной точности и повышенной точности, с указанием предельных отклонений на размеры.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что при использовании современного оборудования и технологий существует возможность получения шаров повышенной точности, которые за счет снижения концентрации напряжений будут минимально подвержены разрушению в процессе закалки и внешних воздействий.

© Рубцов В. Ю., Шевченко О. И., Алыпов П. А., Лебедев В. А., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Ключевые слова: мелющий шар, размер, погрешность, повышенная точность.

V. Yu. Rubtsov, O. I. Shevchenko, P. A. Alypov, V. A. Lebedev

GRINDING BALLS WITH PARTICULAR ACCURACY

Abstract.

Backgrounds. It is possible to obtain grinding balls production by cross-helical rolling method, with particular accuracy to their geometry. It is relevant to divide produced grinding balls nomenclature into 2 groups of geometric accuracy. It is recomend use of "particular accuracy" to balls intended for heat treatment into the fifth hardness grade. The study object is grinding balls. The research subject is process of grinding balls production on modern equipment with high geometric parameters achievement. The aim of this resurche is it structure the parameters to which accuracy of the grinding balls geometric dimensions on, determining their influence degree, as well as the maximum deviations for proposed group of high accuracy balls.

Materials and methods. The study was carried out in conditions of the EVRAZ-NTMK JSC rail and beam workshop. Rolling was on modern ball-rolling mill 60-120. The rolls were manufactured at 5-coordinate machining center NORMA L-45, and geometric parameters were controlling on FAROARM measuring machine.

Results. Following limit of geometric accuracy were identified: the limit due to manufacturing quality of deformation tool, the limit in setting ball-rolling mill and the measurement limit. Total limit was calculated under for all sizes of obtained balls. The table with gradation of grinding balls into two groups: ordinary accuracy and high accuracy, indicating maximum deviations in size was compiled.

Conclusions. The study confirms that at now it is possible to obtain increased accuracy balls, which, due to decrease in stress concentration, will be minimally subject to destruction during hardening and external influences.

Keywords: grinding ball, dimension, size deviation, particular accuracy.

Введение

В настоящее время под понятием качества мелющих шаров подразумевается в большей степени группа твердости. Согласно ГОСТ 7524–2015 [1] количество групп твердости достигло 5 благодаря появлению новых марок стали [2–5], современных технологий термообработки и их контроля [6–9], оборудования [10, 11] и возможности сквозного прокаливания. Однако значительные отклонения от номинального профиля на поверхности шаров после термообработки на высокую твердость создают напряжения и могут привести к образованию трещин или разрушению шаров. Согласно ГОСТ [1] точность геометрии мелющих шаров обусловлена параметрами, представленными в табл. 1.

Также согласно ГОСТ 7524–2015 допускаются любые дефекты, не выходящие за размеры предельных отклонений шара. Но в промышленных испытаниях при закалке на высокую твердость такие дефекты приводили к разрушению шаров. Поэтому для обеспечения гарантии уменьшения остаточных напряжений, зависящих от искажения размеров шаров, предлагается разбить номенклатуру шаров на две группы: шары с обыкновенной точностью (в соответствии с табл. 1) и шары с повышенной точностью. Для того чтобы опре-

делить допустимые предельные отклонения для предлагаемых групп шаров, будут рассмотрены факторы, влияющие на получение геометрии шара.

Таблица 1

Предельные отклонения размеров, объем и масса шаров

Условный диаметр, мм	Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение по номинальному диаметру, мм	Расчетный номинальный объем, см³	Расчетная номинальная масса, кг
50	52,0	±3,0	74	0,58
60	62,0		125	0,98
70	73,0		204	1,60
80	83,0		299	2,35
90	94,0	±4,0	435	3,41
100	104,0		589	4,62
110	114,0		776	6,09
120	125,0	±5,0	1023	8,03

1. Способы производства мелющих шаров и факторы, влияющие на точность изготовления

Мелющие шары изготавливают литьем, ковкой, прокаткой и штамповкой. Наиболее производительный из всех перечисленных способов – прокатка, который в России из всех представленных способов доминирует над остальными по объему произведенных мелющих шаров. В дальнейшем будут рассмотрены критерии, связанные с получением мелющих шаров повышенной точности именно прокаткой. Согласно проведенным исследованиям точность получаемых шаров связана как с технологией изготовления валков и применяемой калибровкой, техническими характеристиками используемого оборудования, так и качеством настройки самого стана. Для оценки факторов, влияющих на точность производства шаров, составлена формула расчета суммарной относительной погрешности изготовления. Относительная погрешность изготовления равна отношению абсолютной погрешности изготовления к опорному значению величины:

$$\Delta_{\text{общ}} = \sum \Delta_i = \Delta_{\text{вал}} + \Delta_{\text{настр}} + \Delta_{\text{и.ш}}, \quad (1)$$

где $\Delta_{\text{вал}}$ – погрешность, обусловленная качеством изготовления инструмента деформации; $\Delta_{\text{настр}}$ – погрешность настройки стана; $\Delta_{\text{и.ш}}$ – погрешность измерений.

Далее подробно будут представлены каждый из перечисленных факторов.

2. Погрешность, зависящая от качества инструмента деформации

Погрешность, зависящая от качества инструмента деформации:

$$\Delta_{\text{вал}} = \Delta_{\text{кал}} + \Delta_{\text{изг}} + \Delta_{\text{и.в}}, \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{кал}}$ – относительная погрешность, вызванная использованием метода калибровки (погрешность, обусловленная несовершенством метода калибровки).

Величина погрешности зависит от размеров бочки шаропрокатных валков [12] с рекомендуемым параметром диаметра бочки валка, равным 5–6 диаметров прокатываемого профиля, и от метода калибровки.

Для получения шаров повышенной точности предпочтительна калибровка валков с непрерывно-изменяющимся шагом [13, 14].

В статье [15] было описано изготовление шаров условного диаметра 120 мм с применением калибровки валков с непрерывно-изменяющимся шагом, в результате чего получены шары диаметром 125 ± 0,4 мм.

Результаты были получены в «идеальных» условиях: при наличии инструмента деформации, имеющего минимальные отклонения от номинальной формы, и тщательно настроенного оборудования стана. Относительная погрешность изготовления, зависящая от применяемой калибровки, при этом составит

$$\Delta_{\text{кал}} = 0,0064 d_{\text{ш}},$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр шара.

В условиях реального производства на относительную погрешность изготовления будут влиять: оборудование, на котором изготавливают валки, качество оснастки и инструмента, а также способ термообработки валков.

При изготовлении валков на токарно-винторезных станках групп 1-Н65 (ДИП-500) и прочих аналогах абсолютная погрешность профиля рабочей формообразующей поверхности инструмента деформации (валка диаметром 700 мм, который является наиболее распространенным для производства шаров с условным диаметром 120 мм) может достигать ±2 мм.

При изготовлении валков на 5-координатных обрабатывающих центрах типа NORMA L-45 абсолютная погрешность составляет ±0,5 мм, поэтому можно сделать вывод, что только применение высокоточного оборудования позволит произвести изготовление валков с точностью, допускаемой для получения профиля повышенной точности шаров.

Относительная погрешность изготовления при этом будет равна $\Delta_{\text{изг}} = 0,008 d_{\text{ш}}$.

Погрешность измерения параметров изготовленного валка будет зависеть от средств измерений, которые при этом используются.

Традиционно контроль параметров изготовленного валка выполняется дифференцированным методом средствами допускового контроля (шаблонами). При этом некоторые параметры: шаг винтовой линии, соосность диаметров, радиусы сопряжения, – контролировать в полной мере не удается. Поэтому такой метод не приемлем для качественного контроля валков, предназначенных для получения шаров повышенной точности.

В нашем случае для контроля валков предлагается применять мобильную контрольно-измерительную машину (КИМ) (измерительная рука от компании FARO или от компании ROMER).

На рис. 1 изображены данные, полученные измерением FAROARM.

Относительная погрешность при измерениях валка данным средством измерений составит

$$\Delta_{\text{и.в}} = 0,00056 d_{\text{ш}}.$$

С учетом всех составляющих погрешности суммарная относительная погрешность инструмента деформации по формуле (2) составит

$$\Delta_{\text{вал}} = 0,01496 d_{\text{ш}}.$$

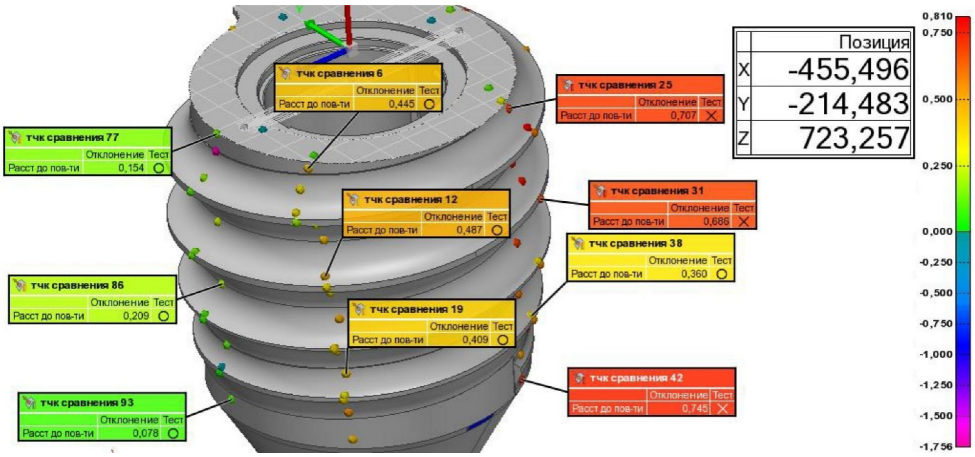


Рис. 1. Результаты измерения FAROARM шаропрокатного валка для шаров 120 мм

3. Погрешность настройки стана

Погрешность настройки стана ($\Delta_{настр}$) будет зависеть от системы управления станом и жесткости системы стана, а также от соответствия настроек монтажной схеме прокатки. Для станов с ручным, механическим и электромеханическим приводом точность настройки будет зависеть от точности координации данных механизмов и точности изготовления элементов сборки с допустимыми люфтами. На шаропрокатном стане РБЦ АО «ЕВРАЗ-НТМК» 60-120 KOCHH&K ALPINE METAL TECH установлено дистанционное автоматическое управление электромеханических приводов с гидравлическими зажимами, что обеспечивает настройку с точностью 0,1 мм для горизонтального сведения валков и 0,01° для ориентации вертикального наклона валков (рис. 2).

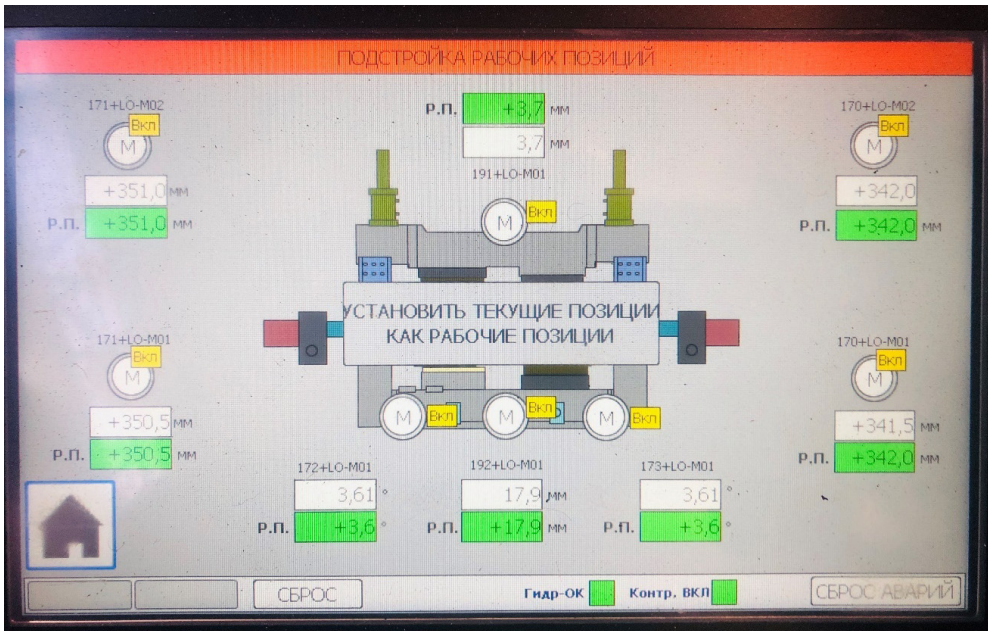


Рис. 2. Toach-panel шаропрокатного стана 60-120 АО «ЕВРАЗ-НТМК»

Линейная точность при длине бочки валка 600 мм (для получения условного шара 120) составит: $\Delta_{верт} = 600 \cdot \mathrm{tg}\, 0{,}01^{\circ} = 0{,}1$ мм, соответственно точность углового сведения и горизонтального составит 0,1 мм. Тогда наибольшая абсолютная погрешность будет

$$\Delta_{настр.\ абс} = \sqrt{\Delta^2_{верт} + \Delta^2_{гор}}\ , \qquad (3)$$

$$\Delta_{настр.\ абс} = 0{,}1414\,.$$

Относительная величина настройки для номинального размера шара 125 мм составит

$$\Delta_{настр} = 0{,}00113 d_{ш}.$$

Соответствие настроек монтажной схеме прокатки будет определяться для того или иного профиля индивидуально. Режим настройки был описан в статье [16].

4. Погрешность измерения шара

Для измерения шаров предлагается применять гладкие микрометры по ГОСТ 6507–90 [15].

Погрешности измерений универсальных средств измерений нормированы в рабочем документе РД 50-98-86 «Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051–81)» [18, 19]. Нормированные погрешности измерений охватывают не только погрешности средств измерений, но и составляющие от других источников погрешности, оказывающих влияние на погрешность измерения (установочные меры, базирование, температурные деформации, измерительные усилия и т.д.).

Согласно РД 50-98–86 [18] абсолютная погрешность измерения шара с условным диаметром 120 мм гладким микрометром, находящимся в руках, равна 0,15 мм. Тогда относительная погрешность измерения шаров повышенной точности будет составлять $\Delta_{и.ш} = 0{,}0012 d_{ш}$.

5. Суммарная погрешность и неучтенные факторы

Подставляя в формулу (1) все известные значения, получаем максимальные значения погрешности для шаров повышенной точности:

$$\Delta_{общ} = 0{,}01729 d_{ш}\,.$$

Среди неучтенных погрешностей – искажение после термообработки ТВЧ валков, при этом точность изготовления валков укладывается в расчетную. Такие параметры, как условие окружающей среды и прочие, несущественно влияют на результат и суммарно не будут превышать 0,1 мм.

Одним из важных факторов в данном случае будет являться диаметр заготовки. В формуле (1) он не был учтен, так как данный параметр, регламентированный ГОСТ 2590–2006 [20], накладывается на сумму всех остальных параметров и будет лимитирующим. Учитывая все вышесказанное, составим табл. 2, разбив предельные отклонения на две группы.

Таблица 2

Предельные отклонения размеров мелющих шаров нормальной и повышенной точности

Условный диаметр, мм	Номинальный диаметр, мм	Предельное отклонение по номинальному диаметру, мм	
		обыкновенной точности	повышенной точности
15 20 25	15,0 20,0[1] (20,8[2]) 25,0[1] (26,0[2])	±1,0	±0,5
30 40	31,5 41,5	±2,0	±1,0
50 60 70 80	52,0 62,0 73,0 83,0	±3,0	±1,5
80	83,0		
90 100 110	94,0 104, 114,0	±4,0	±2,0
120	125,0	±5,0	±2,5

Согласно табл. 2 лимитирующим фактором являлся допуск на диаметр заготовки. Так, например, шар 80 может иметь максимальное отклонение с учетом вышесказанного ±0,7 мм, но с учетом допуска на размер заготовки $80^{+0,5}_{-1,3}$ и с учетом погрешностей в номинальных отклонениях отклонение составит ±2,0.

Заключение

С учетом появления на рынке мелющих шаров пятой группы твердости немаловажным является повышение качества геометрии шаров, что обусловливается минимизацией напряжений в процессе закалки и стойкостью к внешним воздействиям. В связи с этим предложено по параметру геометрической точности разбить мелющие шары на две группы (обыкновенной и повышенной точности) и в дальнейшем при производстве шаров пятой группы твердости для гарантированного исключения их дальнейшего разрушения использовать шары «повышенной точности».

Произведен расчет допустимой погрешности шаров повышенной точности в условиях современного оборудования и технологий. Однако для получения такой точности геометрии необходимо применять калибровки с непрерывно-изменяющимися параметрами, изготавливать валки на современном металлорежущем оборудовании, отвечающем требованиям повышенной точности, производить контроль при помощи высокоточных измерительных приборов, а прокатку – на современных станах, имеющих жесткую систему позиционирования механизмов управления станом.

Лимитирующим параметром на предельные отклонения диаметра в большинстве рассматриваемых условных диаметров шаров является допуск на диаметр и овальность заготовки для прокатки шаров, регламентированная ГОСТ 2590–2006.

Библиографический список

1. ГОСТ 7524–2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. – Москва, 2015.
2. **Рубцов, В. Ю.** Освоение производства мелющих шаров 5 группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : тезисы докладов 76-й Междунар. науч.-техн. конф. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2018. – Т. 1. – С. 117–118.
3. **Рубцов, В. Ю.** Освоение производства мелющих шаров пятой группы твердости в условиях АО «ЕВРАЗ-НТМК» / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // Калибровочное бюро. – 2018. – № 13. – С. 20–22.
4. Освоение производства мелющих шаров особо высокой твердости диаметром 80–100 мм / А. Б. Юрьев, О. П. Атконова, Л. В. Корнева и др. // Сталь. – 2010. – № 4. – С. 90–91.
5. Производство мелющих шаров особо высокой твердости / Г. В. Мохов и др. // Металлургия: технологии, управление, инновации, качество : тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2009. – С. 204–207.
6. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров / А. Сахраю, С. Абдельхамид, Б. Моханд Амокран, Ю. Рассим, Б. Али, Б. Абдеррахим // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – № 5. – С. 34–38.
7. Освоение производства мелющих шаров диам. 30 мм с объемной твердостью не менее 60HRC / А. Б. Юрьев, Е. Л. Кузнецов, О. П. Атконова, И. В. Копылов, Е. П. Закаулов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. – 2014. – № 6. – С. 42–43.
8. **Шевченко, О. И.** Апробация термической обработки мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О. И. Шевченко, Г. Е. Трекин, В. Ю. Рубцов, В. В. Курочкин // Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении ИТММ-2019 : материалы 4-й науч.-практ. конф. с Междунар. участием, посвящ. 70-летнему юбилею кафедры «Металловедение, технология термической и лазерной обработки металлов». – Пермь, 2019. – С. 294–297.
9. **Шевченко, О. И.** Термическая обработка мелющих шаров в условиях нового шаропрокатного стана / О. И. Шевченко, Г. Е. Трекин, В. Ю. Рубцов, В. В. Курочкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 110–117.
10. **Аникин, А. В.** Разработка и внедрение непрерывной технологии и исследование оборудования для производства мелющих шаров высокой твердости / А. В. Аникин, П. Н. Тугушев, С. А. Кузнецов // Неделя металлов в Москве : сб. тр. конф. (г. Москва, 11–14 ноября 2014 г.). – Москва, 2015. – С. 338–348.
11. Внедрение технологии трехстадийного термоупрочнения мелющих шаров большого диаметра / В. Г. Ефременко, Е. С. Попов, С. О. Кузьмин, О. И. Труфанова, А. В. Ефременко // Металлург. – 2013. – № 9. – С. 88–92.
12. **Рубцов, В. Ю.** Влияние размеров бочки шаропрокатного валка на качество шара / В. Ю. Рубцов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2017. – Т. 1. – С. 90–93.
13. **Котенок, В. И.** Энергоэкономные калибровки валков шаропрокатных станов / В. И. Котенок, С. И. Подобедов // Металлург. – 2001. – № 9. – С. 45–47.
14. **Котенок, В. И.** Развитие теории формообразования профилей в винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин : дис. … д-ра техн. наук / Котенок В. И. – Москва, 2005. – 342 с.

15. **Рубцов, В. Ю.** Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко // Черная металлургия. – 2018. – № 8 (1424). – С. 58–63.
16. **Рубцов, В. Ю.** Рабочий диапазон параметров шаропрокатного стана / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко, Н. М. Загребайлов // Молодежь и наука : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (25 мая 2018 г.) : в 2 т. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – Т. 1. – С. 18–23.
17. ГОСТ 6507–90. Микрометры. Технические условия. – Москва, 1990.
18. РД 50-98-86 «Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051-81)». – Москва, 1986.
19. ГОСТ 8.051–81. ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. – Москва, 1981.
20. ГОСТ 2590–2006. Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент. – Москва, 2006.

References

1. GOST 7524-2015 *Shary melyushchie stal'nye dlya sharovykh mel'nits* [State Standart 7524-2015 Grinding steel balls for ball mills]. Moscow, 2015. [In Russian]
2. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 76-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Actual issues of modern science, technology and education: proceeding of the 76th International scientific and technical conference]. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G. I. Nosova, 2018, vol. 1, pp. 117–118. [In Russian]
3. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I. *Kalibrovochnoe byuro* [Calibration bureau]. 2018, no. 13, pp. 20–22. [In Russian]
4. Yur'ev A. B., Atkonova O. P., Korneva L. V. et al. *Stal'* [Steal]. 2010, no. 4, pp. 90–91. [In Russian]
5. Mokhov G. V. et al. *Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo: tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Metallurgy: technology, management, innovation, quality: proceedings of All-Russian scientific and practical conference]. Novokuznetsk, 2009, pp. 204–207. [In Russian]
6. Sakhrayu A., Abdel'khamid S., Mokhand Amokran B., Rassim Yu., Ali B., Abderrakhim B. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. 2017, no. 5, pp. 34–38. [In Russian]
7. Yur'ev A. B., Kuznetsov E. L., Atkonova O. P., Kopylov I. V., Zakaulov E. P. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' NTI ChM* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information. Bulletin of scientific, technical and economic information]. 2014, no. 6, pp. 42–43. [In Russian]
8. Shevchenko O. I., Trekin G. E., Rubtsov V. Yu., Kurochkin V. V. *Innovatsionnye tekhnologii v materialovedenii i mashinostroenii ITMM-2019: materialy 4-y nauch.-prakt. konf. s Mezhdunar. uchastiem, posvyashch. 70-letnemu yubileyu kafedry «Metallovedenie, tekhnologiya termicheskoy i lazernoy obrabotki metallov»*. [Innovation technologies in material science and machine-building ITMM-2019: proceedongs of the 4th scientific and practical conference with international participation devoted to the 70th anniversary of the sub-department “General metallurgy, metal thermal and laser treatment technology”]. Perm, 2019, pp. 294–297. [In Russian]
9. Shevchenko O. I., Trekin G. E., Rubtsov V. Yu., Kurochkin V. V. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie i materialovedenie* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Machine-building and material science]. 2019, vol. 21, no. 3, pp. 110–117. [In Russian]

10. Anikin A. V., Tugushev P. N., Kuznetsov S. A. *Nedelya metallov v Moskve: sb. tr. konf. (g. Moskva, 11–14 noyabrya 2014 g.)* [Metals week in Moscow: procceding of conference (Moscow, November 11-14, 2014)]. Moscow, 2015, pp. 338–348. [In Russian]
11. Efremenko V. G., Popov E. S., Kuz'min S. O., Trufanova O. I., Efremenko A. V. *Metallurg* [Metallurgist]. 2013, no. 9, pp. 88–92. [In Russian]
12. Rubtsov V. Yu. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual issues of modern science, technology and education]. 2017, vol. 1, pp. 90–93. [In Russian]
13. Kotenok V. I., Podobedov S. I. *Metallurg* [Metallurgist]. 2001, no. 9, pp. 45–47. [In Russian]
14. Kotenok V. I. *Razvitie teorii formoobrazovaniya profiley v vintovykh kalibrakh i sozdanie vysokoeffektivnykh protsessov i oborudovaniya dlya prokatki detaley mashin: dis. d-ra tekhn. nauk* [Development of the theory of forming profiles in screw calibers and the creation of highly efficient processes and equipment for rolling machine parts: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Moscow, 2005, 342 p. [In Russian]
15. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous metallurgy]. 2018, no. 8 (1424), pp. 58–63. [In Russian]
16. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I., Zagrebaylov N. M. *Molodezh' i nauka: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (25 maya 2018 g.): v 2 t.* [Youth and Science: proceedings of International scientific and practical conference (May 25, 2018): in 2 volumes]. Nizhniy Tagil: NTI (filial) UrFU, 2018, vol. 1, pp. 18–23. [In Russian]
17. GOST 6507–90. *Mikrometry. Tekhnicheskie usloviya* [State Standart 6507-90. Micrometers. Specifications]. Moscow, 1990. [In Russian]
18. RD 50-98-86 *«Metodicheskie ukazaniya. Vybor universal'nykh sredstv izmereniy lineynykh razmerov do 500 mm. (Po primeneniyu GOST 8.051-81)»* [RD 50-98-86 “Methodical instructions. Selection of universal measuring instruments for linear dimensions up to 500 mm. (By application of the State Standart 8.051-81)”]. Moscow, 1986. [In Russian]
19. GOST 8.051–81. GSI. *Pogreshnosti, dopuskaemye pri izmerenii lineynykh razmerov do 500 mm*. [State Standart 8.051-81. GSI. Inaccuracies allowed when measuring linear dimensions up to 500 mm.]. Moscow, 1981. [In Russian]
20. GOST 2590–2006. *Prokat sortovoy stal'noy goryachekatanyy kruglyy. Sortament* [State Standart 2590-2006. Hot-rolled high-quality steel round. Assortment]. Moscow, 2006. [In Russian]

Рубцов Виталий Юрьевич
калибровщик, рельсобалочный цех, АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (Россия, Свердловская область, г. Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1); аспирант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

E-mail: Uriylot@mail.ru

Rubtsov Vitaliy Yur'evich
Roll pass designer, rail and structural shop, joint-stock “EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant” (1 Metallurgov street, Nizhny Tagil, Sverdlovsk region, Russia); postgraduate student, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Шевченко Олег Игоревич
доктор технических наук, заведующий кафедрой металлургических технологий, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59)

E-mail: Shevchenko_Oleg@mail.ru

Shevchenko Oleg Igorevich
Doctor of engineering sciences, head of the sub-department of metallurgic technologies, Nizhny Tagil Technological Institute (branch) Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (59 Krasnogvardeyskaya street, Nizhny Tagil, Russia)

Алыпов Павел Алексеевич
старший калибровщик, рельсобалочный цех, АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (Россия, Свердловская область, г. Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1)

E-mail: Pavel.Alypov@evraz.com

Alypov Pavel Alekseevich
Senior roll pass designer, rail and structural shop, joint-stock “EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant” (1 Metallurgov street, Nizhny Tagil, Sverdlovsk region, Russia)

Лебедев Владимир Алексеевич
главный специалист по метрологии, АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (Россия, Свердловская область, г. Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1)

E-mail: Vladimir.Lebedev@evraz.com

Lebedev Vladimir Alekseevich
Senior specialist of metrology, joint-stock “EVRAZ Nizhny Tagil Metallurgical Plant” (1 Metallurgov street, Nizhny Tagil, Sverdlovsk region, Russia)

Образец цитирования:

Рубцов, В. Ю. Мелющие шары повышенной точности / В. Ю. Рубцов, О. И. Шевченко, П. А. Алыпов, В. А. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 86–96. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-9.

УДК 621
DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-10

Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ ЯЧЕЕК НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ ПОЛИМЕРНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация.

Актуальность и цели. Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей. Целью работы является исследование влияния технологических дефектов в ПСКМ, полученных по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии, на их сопротивление деформированию и разрушению, учету этого влияния при проектировании.

Материалы и методы. В качестве исследуемых материалов выбраны полимерные слоистые композиционные материалы на основе углеродных тканей и эпоксидных связующих. При изучении технологических дефектов использованы оптические методы исследования микро- и макроструктуры, при экспериментальном исследовании сопротивления деформированию и разрушению – методы лабораторных испытаний, при теоретическом исследовании – методы компьютерного моделирования.

Результаты. Установлены зависимости между статистическими характеристиками технологических дефектов в ПСКМ, с одной стороны, и характеристиками его сопротивление деформированию и разрушению – с другой стороны.

Выводы. Влияние отклонений углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев от проектных значений на характеристики его сопротивления деформированию и разрушению существенно и должно учитываться при проектировании. Влияние используемой технологии получения ПСКМ на его физико-механические свойства тоже должно учитываться.

Ключевые слова: полимерные слоистые композиционные материалы, технологические дефекты, репрезентативная ячейка, сопротивление деформированию и разрушению.

© Карташова Е. Д., Муйземнек А. Ю., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

E. D. Kartashova, A. Yu. Muyzemnek

THE INFLUENCE OF PARAMETERS' TECHNOLOGICAL DEVIATIONS OF REPRESENTATIVE CELLS ON RESISTANCE TO DEFORMATION AND FRACTURE OF POLYMER LAYER COMPOSITE MATERIALS

Abstract.

Background. One of the promising ways to ensure high performance requirements of modern aerospace, automotive and military equipment while reducing its mass is to use polymer layered composite materials (PSKM). One of the reasons hindering the wider use of these materials is the presence of technological defects that have a significant impact on the physicomechanical characteristics of these materials, including the characteristics of resistance to deformation and fracture. Technological defects include deviations of the weight and thickness of PSKM from design values, porosity, deviations of the angles of orientation of the fabric threads in the layer, deviations of the angles of laying layers, the spread of the distance between the threads in the layer of PSKM, the waviness of the threads. The aim of the work is to study the influence of technological defects in PSCM, obtained by the technology of manual molding, vacuum bag and vacuum infusion, on their resistance to deformation and destruction, taking this influence into account in the design.

Materials and methods. As the studied materials, polymer layered composite materials based on carbon fabrics and epoxy binders were selected. In the study of technological defects, optical methods were used to study the micro- and macrostructures, while experimental studies of the resistance to deformation and fracture were used in laboratory tests, and in theoretical studies, computer simulation methods were used.

Results. The dependencies between the statistical characteristics of technological defects in PSKM on the one hand and the characteristics of its resistance to deformation and destruction on the other hand are established.

Conclusions. The influence of deviations of the angles of orientation of the fabric threads in the layer, deviations of the angles of laying layers from the design values on the characteristics of its resistance to deformation and destruction is significant and should be taken into account when designing. The influence of the technology used to obtain PSKM on its physical and mechanical properties should also be taken into account.

Keywords: polymer layered composite materials, technological defects, representative cell, resistance to deformation and destruction.

Введение

Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающей более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое

ПСКМ, волнистость нитей. Классификация и результаты исследования морфологии технологических дефектов ПСКМ приводятся в работах [1, 2].

Для оценки сопротивления деформированию и разрушению ПСКМ может использоваться ряд характеристик, описание которых приводится в работе [3]. В данной работе из этого ряда для оценки сопротивления деформированию используются только инженерные константы, а для оценки сопротивления разрушению – только пределы прочности в направлении максимального сопротивления.

Целью работы является исследование влияния технологических дефектов в ПСКМ, полученных по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии, на их сопротивление деформированию и разрушению, учет этого влияния при проектировании.

Исследуемыми технологическими дефектами являются отклонения массы и толщины ПСКМ от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей тканей в слое, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей.

Под репрезентативной ячейкой понимается минимальный объем, дающий полное представление о структуре ПСКМ.

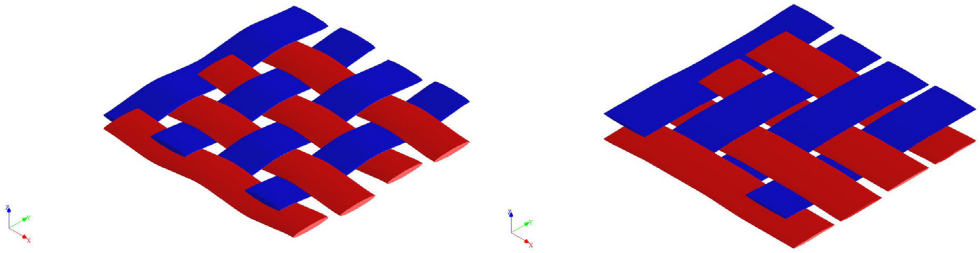
Исследование влияния отклонений технологических отклонений параметров репрезентативной ячейки ПСКМ на его сопротивление деформированию и разрушению осуществляется на примере двух модельных ПСКМ:

– первый модельный материал – из углеткани 200 г/м^2, 3К и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющий полотняное плетение (плейн);

– второй модельный материал – из углеткани 200 г/м^2, 3К и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющий саржевое плетение (твил 2/2).

Рассматриваемые материалы изготовлены по технологиям ручного формования, вакуумного мешка и вакуумной инфузии. Каждый материал состоит из четырех одинаково направленных слоев.

Репрезентативные ячейки этих материалов показаны на рис. 1, их внешний вид – на рис. 2, характеристики репрезентативной ячейки – в табл. 1.



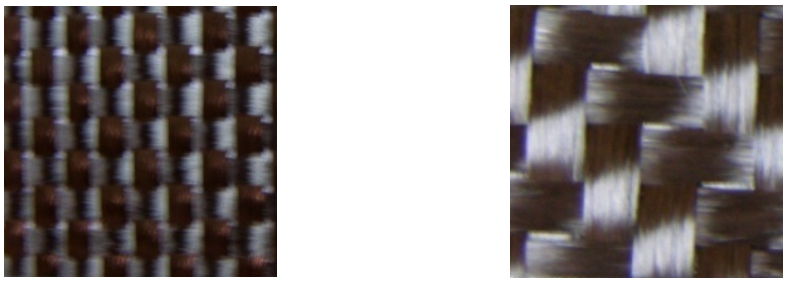
а) ***б***)

Рис. 1. Репрезентативные ячейки: ***а*** – плейн; ***б*** – твил

1. Технологические отклонения параметров репрезентативных ячеек полимерных слоистых композиционных материалов

Методики определения отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ, необходимое для этого оборудование, морфологические особенности строения этих технологических дефектов приведены в работах [2, 3]. Результаты определений характеристики отклонений массы, толщины и пористости рассматриваемых ПСКМ приведены в табл. 1. Доверительные интервалы фи-

зических величин, значения которых приведены в табл. 2–7, определены при доверительной вероятности 0,9.



а) ***б***)

Рис. 2. Внешний вид тканевого слоя: ***а*** – плейн; ***б*** – твил

Таблица 1

Характеристики репрезентативной ячейки

Характеристика тканевого слоя	Номер материала	
	первый	второй
Тип плетения	плейн	твил 2/2
Толщина ткани, мм	0,24	0,2
Плотность укладки нитей, см$^{-1}$	8,2	4,9
Ширина нитей, мм	0,91	1,78
Пористость ткани, %	53,7	44,4

Таблица 2

Характеристики отклонений массы, толщины и пористости ПСКМ

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1. Математическое ожидание относительного отклонения массы ПСКМ, %	71,4 ± 1,25	30,3 ± 1,17	37,2 ± 0,44
2. Среднеквадратическое отклонение относительной массы ПСКМ, %	5,86	5,4	2,0
3. Математическое ожидание относительного отклонения толщины ПСКМ, %	72,6 ± 3,68	56,7 ± 2,64	54,0 ± 0,606
4. Среднеквадратическое отклонение относительной толщины ПСКМ, %	17,2	12,3	2,85
5. Математическое ожидание пористости ПСКМ, %	3,03 ± 0,90	16,46 ± 1,45	10,95 ± 0,37
6. Среднеквадратическое отклонение пористости ПСКМ, %	4,20	6,78	1,73

Методики определения отклонений угла ориентации нитей в репрезентативной ячейке и угла ориентации нитей в слое, необходимое для этого обо-

рудование, морфологические особенности строения этих дефектов приведены в работах [2, 3]. Характеристики отклонений угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев приведены в табл. 3. Доверительные интервалы физических величин, значения которых приведены в таблицах 2–5, определены при доверительной вероятности 0,9.

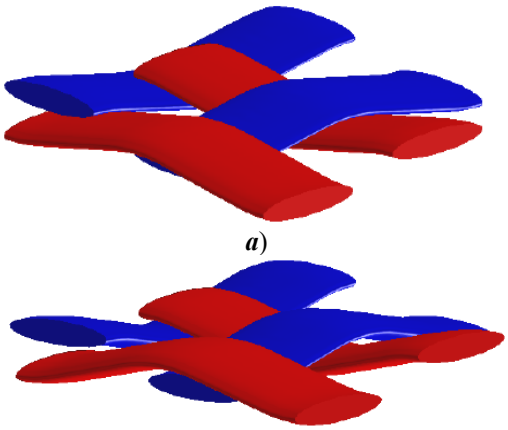
Таблица 3

Характеристики отклонений угла ориентации нитей и углов ориентации тканевых слоев

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1. Математическое ожидание отклонение угла ориентации нитей от проектных значений, град	2,9 ± 0,35	2,3 ± 0,37	2,2 ± 0,34
2. Среднеквадратическое отклонение угла ориентации нитей от проектных значений, град	2,9	3,1	2,8
3. Математическое ожидание углов ориентации тканевых слоев, град	1,6 ± 0,45	1,7 ± 0,45	1,6 ± 0,45
4. Среднеквадратическое отклонение углов ориентации тканевых слоев, град	3,5	3,5	3,4

Параметрами репрезентативной ячейки являются относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ и коэффициент волнистости нитей.

Относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ (рис. 3) – отношение расстояния между нитями в репрезентативной ячейке к толщине нити. Этот параметр имеет значения от 0 до 1. Значение, большее единицы, гарантирует наличие связующего в области между нитями. Значение по умолчанию равно 0.

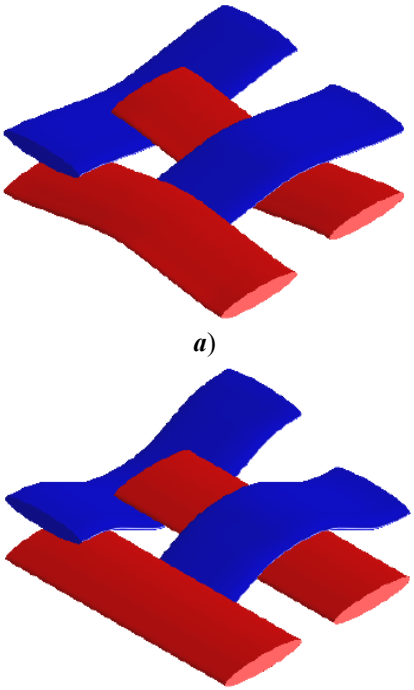


а)

б)

Рис. 3. Относительное расстояние между нитями в слое ПСКМ:
а – относительное расстояние равно нулю;
б – относительное расстояние равно 0,25

Коэффициент волнистости нитей (рис. 4) – параметр, характеризующий извилистость нитей утка или основы в репрезентативной ячейке. Значение коэффициента волнистости нитей по умолчанию составляет 0,5, что соответствует 50 % извилистости для нити основы и утка. Значение 1 соответствует извилистости 100 % для нитей основы и 0 % для уточной пряжи.



а)

б)

Рис. 4. Коэффициент волнистости нитей: ***а*** – коэффициент волнистости равен 0,5; ***б*** – коэффициент волнистости равен 1

Характеристики отклонений относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое от проектных значений приведены в табл. 4. Доверительные интервалы физических величин, значения которых приведены в табл. 2–5, определены при доверительной вероятности 0,9.

Таблица 4

Характеристики относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое

Наименование характеристики дефектности ПСКМ	Наименование технологии получения ПСКМ		
	ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1	2	3	4
1. Математическое ожидание относительного расстояния между нитями в слое ПСКМ, %	65,0 ± 0,90	30,4 ± 1,45	34,9 ± 0,37

Окончание табл. 4

1	2	3	4
2. Среднеквадратическое отклонение относительного расстояния между нитями в слое ПСКМ, %	4,20	6,78	1,73
3. Математическое ожидание коэффициент волнистости, %	15,1 ± 0,90	7,4 ± 1,45	8,9 ± 0,37
4. Среднеквадратическое отклонение коэффициент волнистости, %	4,20	6,78	1,73

2. Влияние технологических отклонений на сопротивление деформированию полимерных слоистых композиционных материалов

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление деформированию определены статистические характеристики инженерных констант репрезентативных ячеек при случайных значениях отклонений угла ориентации нитей. При этом инженерные константы репрезентативных ячеек определялись путем проведения компьютерного моделирования.

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации нитей приведены в табл. 5. Инженерные константы определялись в системе координат, ось *1* которой направлена вдоль биссектрисы угла, образованного проекциями осей нитей на плоскость композита, ось *2* лежит в плоскости композита и перпендикуляра оси *1*, ось *3* образует с осями *1* и *2* левую тройку.

Статистические характеристики инженерных констант, приведенные в табл. 5, получены для первого модельного материала (из углеткани 200 г/м^2, 3К и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющего полотняное плетение), однако качественно близкие результаты были получены и для второго модельного материала (из углеткани 200 г/м^2, 3К и эпоксидной системы Epolam 2017, имеющего саржевое плетение 2/2).

При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3.

Анализ данных, приведенных табл. 5, свидетельствует о следующем:

– статистический разброс значений инженерных констант является существенным, так как, например, коэффициент вариации модуля продольной упругости E_1 достигает 7 %;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант, например: среднеквадратическое отклонение модулей продольной упругости E_1 ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, отличается на 11 %.

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации тканевых слоев от проектных значений на сопротивление деформированию определены статистические характеристики инженерных констант четырехслойных композитов при случайных значениях отклонений углов ориентации тканевых слоев. При этом инженерные константы репрезентативных ячеек определялись путем проведения компьютерного моделирования.

Таблица 5

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации нитей

Обозначение инженерной константы	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
1	2	3	4	5
Модули продольной упругости, ГПа				
E_1	23,5 ± 1,53	1,535	1,646	1,482
E_2	23,5 ± 1,53	1,535	1,646	1,482
E_3	20,2 ± 0,02	0,027	0,0255	0,219
Коэффициенты Пуассона				
ν_{12}	$0,67 \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	0,043	0,463	0,042
ν_{21}	$0,67 \pm 4,3 \cdot 10^{-2}$	0,043	0,463	0,042
ν_{13}	$0,14 \pm 8,9 \cdot 10^{-3}$	0,008	0,095	0,009
ν_{31}	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,001
ν_{23}	$0,14 \pm 8,9 \cdot 10^{-3}$	0,008	0,001	0,009
ν_{32}	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,0001
Модули сдвига, ГПа				
G_{12}	24,3 ± 0,06	0,067	0,072	0,066
G_{13}	6,34 ± 0,12	0,132	0,148	0,126
G_{23}	6,34 ± 0,12	0,132	0,148	0,126

Исследованию были подвергнуты первый и второй модельные материалы. Они имели одинаковую проектную ориентацию тканевых слоев: одинаковое направление нитей основы.

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации тканевых слоев приведены в табл. 6. Инженерные константы определялись в описанной ранее системе координат.

При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений углов ориентации тканевых слоев, приведенные в табл. 3.

Анализ данных, приведенных табл. 6, свидетельствует о следующем:

– статистический разброс значений инженерных констант является существенным, так как, например, коэффициент вариации модуля продольной упругости E_1 достигает 8,3 %;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант, например: среднеквадратическое отклонение модулей продольной упругости E_1 ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, отличается на 10,7 %.

С целью исследования влияния относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на сопротивление де-

формированию были определены статистические характеристики инженерных констант репрезентативных ячеек при случайных отклонениях относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое.

Таблица 6

Статистические характеристики инженерных констант ПСКМ при случайных отклонениях угла ориентации тканевых слоев

Обозначение инженерной константы	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
Модули продольной упругости, ГПа				
E_1	23,5 ± 1,84	1,838	1,961	1,774
E_2	23,5 ± 1,84	1,838	1,961	1,774
E_3	20,2 ± 0,03	0,026	0,028	0,025
Коэффициенты Пуассона				
ν_{12}	$0,67 \pm 4,6 \cdot 10^{-2}$	0,046	0,049	0,044
ν_{21}	$0,67 \pm 4,6 \cdot 10^{-2}$	0,046	0,049	0,044
ν_{13}	$0,14 \pm 9,3 \cdot 10^{-3}$	0,009	0,010	0,009
ν_{31}	$0,12 \pm 1,0 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,000	0,000
ν_{23}	$0,14 \pm 9,3 \cdot 10^{-3}$	0,009	0,010	0,009
ν_{32}	$0,12 \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,001	0,0001
Модули сдвига, ГПа				
G_{12}	24,3 ± 0,08	0,081	0,085	0,078
G_{13}	6,34 ± 0,15	0,154	0,164	0,148
G_{23}	6,34 ± 0,15	0,154	0,164	0,148

Статистические характеристики инженерных констант определялись для первого и второго модельного материалов, аналогично тому, как это было сделано при исследовании влияния отклонений угла ориентации нитей.

Анализ полученных данных не выявил существенного влияния относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на значения инженерных констант.

3. Влияние технологических отклонений на сопротивление разрушению полимерных слоистых композиционных материалов

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование деформирования до разрушения репрезентативных ячеек рассматриваемых модельных композитов при различных значениях угла приложения нагрузки. При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3.

Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных значениях угла ориентации нитей приведены в табл. 7. Статистические характеристики приведены для первого модельного материала.

Таблица 7

Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных значениях угла ориентации нитей, МПа

Угол приложения нагрузки, град	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
0	987,2 ± 15,5	79	84,4	76,3
11,25	290,9 ± 4,6	23,2	24,9	22,5
22,5	155,3 ± 2,4	12,4	13,3	12
45	105,2 ± 1,6	8,4	9	8,2

Анализ данных, приведенных табл. 7, свидетельствует о следующем:

– предел прочности рассматриваемого ПСКМ существенно зависит от направления приложения нагрузки, при изменении направления приложения нагрузки от 0 до 45° предел прочности уменьшается в 9,4 раза;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс предела прочности, например: среднеквадратическое отклонение предела прочности ПСКМ, полученных по технологии вакуумного мешка и вакуумной инфузии, при угле приложении нагрузки, равном 0, отличается на 10,6 %.

С целью исследования влияния отклонений углов ориентации слоев от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование для определения предела прочности в направлении наименьшего сопротивления композита при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев. При проведении расчетов использовались статистические характеристики отклонений угла ориентации нитей, приведенные в табл. 3. Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных углах ориентации тканевых слоев, приведены в табл. 8. Статистические характеристики приведены для первого модельного материала.

Таблица 8

Статистические характеристики предела прочности ПСКМ при случайных углах ориентации тканевых слоев, МПа

Угол приложения нагрузки, град	Наименование статистической характеристики			
	Математическое ожидание	Среднеквадратическое отклонение		
		Технологии получения ПСКМ		
		ручное формование	вакуумный мешок	вакуумная инфузия
0	1046,4 ± 16,4	83,7	89,5	80,8
11,25	308,4 ± 4,8	24,7	26,4	23,8
22,5	164,6 ± 2,6	13,2	14,4	12,7
45	111,5 ± 8,9	8,9	9,5	8,6

Анализ данных, приведенных табл. 8, свидетельствует о том, что предел прочности рассматриваемого ПСКМ в направлении максимального сопротивления увеличивается при появлении разброса углов ориентации тканевых слоев. Увеличение предела прочности составляет 6 %.

Заключение

В работе исследовано влияние таких технологических дефектов, как отношение отклонения массы и толщины от проектных значений, пористость, отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей, отклонения углов укладки слоев, разброс расстояния между нитями в слое ПСКМ, волнистость нитей, на сопротивление деформированию и разрушению ПСКМ. Определены количественные показатели этого влияния.

В результате исследования установлено:

– отклонения угла ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев от проектных значений приводят к существенному изменению инженерных констант, а также пределов прочности композита при всех направлениях приложения нагрузки. Статистический разброс углов ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев приводит к существенному разбросу инженерных констант и пределов прочности модельных ПСКМ;

– технология получения ПСКМ оказывает существенное влияние на статистический разброс значений инженерных констант и пределов прочности композита в направлении его наибольшего сопротивления;

– влияние относительного расстояния между нитями в слое и коэффициента волнистости нитей в слое на сопротивление деформированию и разрушению модельных материалов несущественное;

– определенные при проведении исследования статистические характеристики инженерных констант и пределов прочности модельных материалов должны быть использованы при проектировании изделий из них.

Библиографический список

1. **Карташова, Е. Д.** Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 79–89.
2. **Карташова, Е. Д.** Исследование пористости полимерных слоистых композиционных материалов, полученных методом вакуумной инфузии / Е. Д. Карташова, М. А. Косова, А. А. Желудкова, А. Ю. Муйземнек // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : материалы III Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза, 2018. – С. 185–188.
3. **Карташова, Е. Д.** Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 134–145.

References

1. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 79–89. [In Russian]

2. Kartashova E. D., Kosova M. A., Zheludkova A. A., Muyzemnek A. Yu. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: Materialy III Vseros. nauch-tekhn. konf.* [Innovation of technical solutions in mechanical engineering and transport: proceedings of the III All-Russian scientific and technical conference]. Penza, 2018, pp. 185–188. [In Russian]
3. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 3 (43), pp. 134–145. [In Russian]

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mailto:katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitrievna
Postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Муйземнек Александр Юрьевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики и графики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Muyzemnek Aleksandr Yur'evich
Doctor of engineering sciences, professor, head of the sub-department of theoretical and applied mechanics and graphics, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Карташова, Е. Д. Влияние технологических отклонений параметров репрезентативных ячеек на сопротивление деформированию и разрушению полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 97–108. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-10.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], …). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

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 специальности журнала:

05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

05.02.08 Технология машиностроения

05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении

05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)

05.11.14 Технология приборостроения

05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 36-84-87. E-mail: VolgaVuz@mail.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.