

## **Уважаемые читатели и авторы!**

Редакция журнала открыта для сотрудничества и приглашает к публикации ученых, педагогов, аспирантов и практикующих специалистов в образовательной, технической и экономической сферах. Плата за размещение статьи в выпуске не взимается.

*Цели журнала* – удовлетворение потребностей специалистов различного профиля в научной и аналитической информации по вопросам внедрения и использования информационно-коммуникационных технологий (в том числе в образовательном процессе) в условиях цифровой трансформации всех сфер общественной жизни.

*Задачи журнала:* публикация современных достижений в области технических и экономических наук, включая результаты национальных и международных исследований.

Журнал «Цифровая трансформация» зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь (свидетельство о регистрации от 27.09.2017 № 662), перерегистрирован 10.06.2022 (учредитель и издатель – учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»). Журнал включен приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований (отрасли наук: технические (информатика, компьютерная техника), экономические и образование). Также журнал индексируется в базах Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), Directory of Open Access Journals (DOAJ), EconPapers. Префикс DOI 10.35596.

*С электронной версией журнала, редакционной политикой и правилами для авторов* можно ознакомиться на сайте [dt.bsuir.by](http://dt.bsuir.by). Материалы научной статьи для публикации можно подать с помощью специальной формы на сайте журнала или отправить на электронный адрес [dig.tr@bsuir.by](mailto:dig.tr@bsuir.by).

Получение бумажной версии журнала «Цифровая трансформация» доступно через оформление подписки на квартал, полугодие или год по следующим индексам: 75057 – для индивидуальных подписчиков, 750572 – для ведомственных.

*Редакция журнала «Цифровая трансформация»*

# ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ

Научный журнал издается с 1995 г. Выходит ежеквартально.

Ранее издание выходило под названием «Информатизация образования».

В 2017 г. журнал перерегистрирован под названием  
«Цифровая трансформация», ISSN 2522-9613.

## Главный редактор

**Богущ Вадим Анатольевич**, д. ф.-м. н., профессор,  
ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

## Редакционный совет

**Листопад Н. И.**, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь), – заместитель главного редактора;  
**Беляцкая Т. Н.**, д. э. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь), – заместитель главного редактора;  
**Певнева Н. А.**, к. т. н., доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь), – ответственный секретарь редакционной коллегии;  
**Сафонов В. Г.**, д. ф.-м. н., профессор, директор, Институт математики Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Байнев В. Ф.**, д. э. н., к. т. н., профессор, Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Ковалев М. М.**, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. ф.-м. н., профессор, Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Курбацкий А. Н.**, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Хацкевич Г. А.**, д. э. н., профессор, Институт бизнеса Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Голенков В. В.**, д. т. н., профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Быков А. А.**, д. э. н., профессор, Белорусский государственный экономический университет (г. Минск, Республика Беларусь);  
**Сирота А. А.**, чл.-кор. Международной академии информатизации, д. т. н., профессор, Воронежский государственный университет (г. Воронеж, Российская Федерация);  
**Малинецкий Г. Г.**, д. ф.-м. н., профессор, Институт прикладной математики имени М. В. Келдыша Российской академии наук (г. Москва, Российская Федерация);  
**Глухов В. В.**, д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация);  
**Плотников В. А.**, д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный экономический университет (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация);  
**Касумов В. А.**, д. т. н., профессор, Азербайджанский технический университет (г. Баку, Республика Азербайджан);  
**Ордуна-Мале Э.**, д. инф. н., доцент, Технический университет Валенсии (г. Валенсия, Испания);  
**Дземаида Г.**, действительный член Академии наук Литвы, д. т. н., профессор, Вильнюсский университет (г. Вильнюс, Литовская Республика).

Ответственный секретарь: Т. В. Мироненко

---

Подписано в печать 15.03.2023. Формат 60×84 1/8. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе.  
Усл. печ. л. 9,53. Уч.-изд. л. 7,8. Тираж 60 экз. Заказ 32.

Распространяется по подписке. Подписка осуществляется через почтовые отделения связи  
по каталогу газет и журналов Республики Беларусь.

Индекс для индивидуальной подписки – 75057; индекс для ведомственной подписки – 750572.

---

Учредитель и издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,  
ул. П. Бровки, 6, г. Минск, 220013.

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации от 27.06.2017 № 662.

Отпечатано в редакционно-издательском отделе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники», ул. Платонова, 39, г. Минск, 220005

(лицензия на осуществление полиграфической деятельности от 24.12.2020 № 02330/264).

# DIGITAL TRANSFORMATION

The scientific journal is being published since 1995. Publication frequency – quarterly.

The publication previously came out under the title “Informatization of Education” (renamed in 2017).

In 2017 the journal was reregistered as “Digital Transformation”,  
ISSN 2522-9613.

## Head Editor

**V. A. Bogush**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.),  
Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

## Editorial Board

- Listopad N.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor;
- Beliatskaya T.**, Dr. of Sci. (Econ.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Deputy Chief Editor;
- Pevneva N.**, Cand. of Sci., (Tech.), Associate Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus – Executive Secretary of the Editorial Board;
- Safonov V.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Director, Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus;
- Baynev V.**, Dr. of Sci. (Econ.), Cand. of Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus;
- Kovalev M.**, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus;
- Kurbatski A.**, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus;
- Khatskevich G.**, Dr. of Sci. (Econ.), Professor, School of Business of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus;
- Golenkov V.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus;
- Bykau A.**, Dr. of Sci. (Econ.), Professor, Belarus State Economic University, Minsk, Republic of Belarus;
- Sirota A.**, Corresponding member of International Informatization Academy, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation;
- Malinetskiy G.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;
- Glukhov V.**, Dr. of Sci. (Econ.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation;
- Plotnikov V.**, Dr. of Sci. (Econ.), Professor, Saint Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia;
- Gasimov V.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Republic of Azerbaijan;
- Orduna-Malea E.**, Dr. of Sci. (Inform.), Assistant Professor, Technical University of Valencia, Valencia, Spain;
- Dzemyda G.**, Full member of the Lithuanian Academy of Sciences, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Vilnius University, Vilnius, Republic of Lithuania.

Executive secretary of the editorial office: T. V. Mironenka

---

Founder and publisher: Educational Establishment “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”,  
220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki St., 6.

Signed for printing 15.03.2023. Format 60×84 1/4. Office paper. Printed on a risograph.

Ed.-pr. 1. 9,53. Ed.-ed. 1. 7,8. Circulation 60 copies. Order 32.

Distributed by subscription. Subscription is carried out through post offices  
according to the catalog of newspapers and magazines of the Republic of Belarus.

Index for individual subscription – 75057; index for departmental subscription – 750572.

Certificate of state registration of the mass media dated June 27, 2017, No 662.

Address of editorial office: Editorial and Publishing Department of the Educational Establishment “Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics”, Platonova St., 39, Minsk, 220005

(license to carry out printing activities dated December 24, 2020, No 02330/264).

## СОДЕРЖАНИЕ

Т. 29, № 1, 2023

### *Экономические науки, образование*

<b>Зубрицкая И. А.</b> Национальный рынок цифровых ресурсов: теоретико-методологические основы.....	5
<b>Господарик Е. Г., Ковалев М. М.</b> Роль цифровизации в интеграции научно-образовательного пространства ЕАЭС.....	13
<b>Князькова В. С.</b> Оценка эффективности повышения цифровой грамотности персонала в условиях цифровой трансформации .....	23
<b>Galiyeva N. G.</b> Conceptual Framework and Analisis of the Business Incubation Process (Галиева Н. Г. Концептуальная основа и анализ процесса бизнес-инкубирования).....	32

### *Технические науки*

<b>Иваниук А. А.</b> Комбинированный генератор случайных чисел на программируемых логических интегральных схемах .....	36
<b>Вэньцзу Ли.</b> Подход к проверке ответов на объективные вопросы в интеллектуальных обучающих системах .....	48
<b>Лунвэй Цянь.</b> Онтологический подход к приобретению знаний из текстов естественного языка.....	57
<b>Vishniakou U. A., ChuYue Yu.</b> Simulation of IoT Smart Home Network with Decision Making Based on MajorDoMo Platform (Вишняков В. А., ЧуЮэ Юй. Моделирование сети IoT «Умный дом» с принятием решений на основе платформы MajorDoMo.....	64
<b>Чан Ван Чиеу, Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р., Корсак К. В., Чан Туан Чунг, Дао Динь Ха, Колос В. В.</b> Применение систем автоматизированного проектирования для учета механических напряжений при разработке неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа.....	72

## CONTENTS

V. 29, No 1, 2023

### *Economic Sciences, Education*

<b>Zubritskaya I. A.</b> National Digital Resource Market: Theoretical and Methodological Foundations.....	5
<b>Gospodarik C. G., Kovalev M. M.</b> The Role of Digitalization in the Scientific and Educational Space Integration of the EAEU.....	13
<b>Knyazkova V. S.</b> Evaluation of the Effectiveness of Increasing the Digital Literacy of Personnel in the Context of Digital Transformation.....	23
<b>Galiyeva N. G.</b> Conceptual Framework and Analisis of the Business Incubation Process .....	32

### *Technical Sciences*

<b>Ivaniuk A. A.</b> Combined Random Number Generator on Programmable Logic Integrated Circuits.....	36
<b>Wenzu Li.</b> An Answer Verification Approach to Objective Questions in Intelligent Tutoring Systems .....	48
<b>Longwei Qian.</b> Ontology-Based Knowledge Acquisition Method for Natural Language Texts.....	57
<b>Vishniakou U. A., ChuYue Yu.</b> Simulation of IoT Smart Home Network with Decision Making Based on MajorDoMo Platform. ....	64
<b>Tran Van Trieu, Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R., Korsak K. V., Tran Tuan Trung, Dao Dinh Ha, Kolos V. V.</b> Application of Cad Systems to Accounting for Mechanical Stresses in the Development of Uncooled Thermal Detectors of the Bolometric Type .....	72



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-5-12>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 338.3 (476)

## НАЦИОНАЛЬНЫЙ РЫНОК ЦИФРОВЫХ РЕСУРСОВ: ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

И. А. ЗУБРИЦКАЯ

*Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 26.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** В статье изложены теоретико-методологические основы формирования нового экономического понятия «рынок цифровых ресурсов». Выявлена актуальность научного исследования, которая обусловлена необходимостью развития понятийного аппарата цифровой экономики как нового экономического феномена, отсутствием общепризнанных теоретических и методологических подходов к измерению прироста объемов выпуска, потребления в производстве и скорости обращения в национальной экономике продукции сектора информационно-коммуникационных технологий, сопровождающих цифровую трансформацию народного хозяйства. Научно обоснована система экономических показателей, определяющих емкость национального рынка цифровых ресурсов, источников его формирования. Проведена систематизация эмпирических данных и проанализированы результаты расчета авторских показателей предложения и спроса цифровых ресурсов на национальном рынке, что позволило оценить в динамике циркуляцию цифровых ресурсов в общих ресурсах товаров и услуг, долю цифровых ресурсов в составе материальных затрат, вклад отечественного сектора информационно-коммуникационных технологий в цифровую трансформацию отраслей народного хозяйства, импортируемую продукцию.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация народного хозяйства, цифровые ресурсы, рынок цифровых ресурсов, спрос и предложение цифровых ресурсов.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Зубрицкая, И. А. Национальный рынок цифровых ресурсов: теоретико-методологические основы / И. А. Зубрицкая // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-5-12>.

## NATIONAL DIGITAL RESOURCE MARKET: THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS

INESSA A. ZUBRITSKAYA

*Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 26.10.2022*

**Abstract.** The article indicates theoretical and methodological foundations for the formation of a new economic concept of “digital resources market”. The relevance of scientific research is revealed, which is due to the need to develop the conceptual apparatus of the digital economy as a new economic phenomenon, the lack of generally recognized theoretical and methodological approaches to measuring the increase in output, consumption in production and the speed of circulation in the national economy of information and communication technologies sector products accompanying the digital transformation of the national economy. The system of economic indicators determining the capacity of the national market of digital resources and the sources of its formation is scientifically substantiated. The systematization of empirical data was carried out and the results of calculating the author's indi-

cators of the supply and demand of digital resources on the national market were analyzed, which made it possible to assess the dynamics of the circulation of digital resources in the scope of goods and services, the share of digital resources in the composition of material costs, the contribution of the domestic information and communication technologies sector to the digital transformation of the branches of the national economy, imported products.

**Keywords:** digital transformation of the national economy, digital resources, digital resources market, demand and supply of digital resources.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Zubritskaya I. A. (2023) National Digital Resource Market: Theoretical and Methodological Foundations. *Digital Transformation*. 29 (1), 5–12. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-5-12> (in Russian).

## Введение

Основой развития и обеспечения социально-экономической безопасности страны по определению Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь до 2030 года является экономика, базирующаяся на инновациях, эффективном использовании национальных ресурсов и сравнительных конкурентных преимуществах страны. При этом главные инструменты повышения конкурентоспособности – технологические инновации во всех сферах экономики, к которым относится цифровая трансформация<sup>1</sup>. Так, подпрограммой «Цифровое развитие отраслей экономики» Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы<sup>2</sup> одной из основных поставленных задач определено «...развитие инструментов цифровой экономики в различных отраслях национальной экономики, предусматривающих применение передовых технологий в производстве и процессах ведения внешнеэкономической деятельности, формирование необходимых условий для сохранения и повышения конкурентоспособности белорусских предприятий на мировом рынке...».

В результате исследования [1] установлено, что внедрение цифровых технологий в производственные и бизнес-процессы приводит к фундаментальному изменению подходов к управлению субъектами хозяйствования, образующими народное хозяйство страны, – от оптимизации бизнес-процессов, процессов производства, принятия управленческих решений путем горизонтальной и вертикальной интеграции цепочек добавленной стоимости в межотраслевом сетевом взаимодействии участников ее генерирования и далее – к кастомизированному производству с использованием кооперации и субконтрактации как новых форм партнерских отношений. Следует отметить, что при активных цифровых преобразованиях производственных, бизнес-процессов, процессов управления, во-первых, многократно увеличивается объем используемого электронного производственного, телекоммуникационного и сетевого оборудования. Также увеличивается потребление в производстве электронных комплектующих, программного обеспечения, телекоммуникационных, информационных, специальных консультационных услуг. Во-вторых, растут потребление в производстве и накопление предприятием информации, что сопровождается необходимостью привлечения систем обработки большого объема данных, облачных хранилищ, искусственного интеллекта и систем информационной безопасности. В-третьих, возрастает потребность в специалистах, обладающих цифровыми знаниями, навыками и компетенциями.

В связи с опережающим научно-технологическим развитием и масштабным внедрением цифровых технологий во все сферы жизнедеятельности современного человека нужна теоретическая парадигма (в настоящее время отсутствующая в экономической теории), содержащая теоретический базис, необходимый для научного обоснования экономических показателей, позволяющих количественно и качественно измерять выявленные тенденции формирования и развития рынка цифровых ресурсов как технико-технологической основы развития цифровой экономики. Таким образом, отсутствие количественных и качественных методов измерения емкости рынка цифровых ресурсов, целеполагания и прогнозирования его развития составляет актуальность научного исследования, которая обусловлена:

<sup>1</sup> Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года. Минск, 2017. 148 с. <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf>.

<sup>2</sup> О Государственной программе «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 2 февраля 2021 г. № 66. <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100066&p1=1>.

- необходимостью развития понятийного аппарата цифровой экономики;
- необходимостью научного обоснования системы экономических показателей предложения и спроса цифровых ресурсов в народном хозяйстве;
- отсутствием общепризнанных теоретических и методологических подходов к измерению прироста и скорости обращения цифровых ресурсов, сопровождающих цифровую трансформацию народного хозяйства;
- необходимостью разработки предложений по перспективным направлениям цифровой трансформации народного хозяйства.

Установленные в результате анализа фундаментальных научных трудов зарубежных и отечественных ученых [2–7] закономерности цифрового развития, подтвержденные в аналитических отчетах международных рейтингов цифрового развития и международной конкурентоспособности [8], позволили развить существующие теоретические и методологические основы цифровой экономики и разработать определения понятий «рынок цифровых ресурсов» и «цифровые ресурсы», соответствующих выявленным тенденциям, как новым знаниям в современной экономической теории. Так, в контексте исследования под цифровыми ресурсами понимается «...совокупность материальных и нематериальных активов, включаемых в стоимость промышленной продукции частями или полностью, назначение которых состоит в использовании информации в цифровом виде в управлении производственными, продуктовыми и бизнес-процессами...» [9, с. 4].

Рынок цифровых ресурсов – это открытая система экономических отношений, которая характеризуется динамикой обращения в экономике товаров и услуг, основное назначение которых состоит в использовании информации в цифровом виде в управлении производственными, продуктовыми и бизнес-процессами. Таким образом, в итоге проведенного исследования сформулированы определения понятий «цифровые ресурсы» и «рынок цифровых ресурсов», которые позволили на основе статистических баз данных произвести определенные виды классификаций, содержащие:

- перечень товаров и услуг, необходимых для цифровой трансформации народного хозяйства, по своим основным свойствам совпадающих со свойствами цифровых ресурсов, определяемых в авторском понятии;
- совокупность поставщиков товаров и услуг, необходимых для цифровой трансформации народного хозяйства по видам экономической деятельности;
- совокупность потребителей цифровых ресурсов.

В результате развития понятийного аппарата цифровой экономики и анализа методологии существующих рейтингов цифрового развития установлено, что в современной экономической науке отсутствует методологическая база, содержащая экономические показатели, в полной мере качественно и количественно характеризующие цифровые ресурсы – как предлагаемые, так и востребованные на внутреннем и внешнем рынках. На основе исследований и развития теоретического базиса разработан авторский метод измерения динамики предложения на цифровые ресурсы и спроса на них в рамках национального рынка, который заключается в следующей технологии.

Шаг 1. Исследование мирового опыта технико-технологического развития, на основе которого определены технико-технологические средства, необходимые для цифровой трансформации народного хозяйства.

Шаг 2. Группировка продуцентов технико-технологических средств (цифровых ресурсов) на основе сопоставления международных и отечественных классификаторов по видам экономической деятельности и производимой продукции.

Шаг 3. Расчет показателей выпуска и импорта товаров и услуг, обладающих свойствами цифровых ресурсов, в совокупности составляющих их предложение.

Шаг 4. Расчет показателей промежуточного спроса на цифровые ресурсы и конечного потребления.

Шаг 5. Аналитика динамики рассчитанных показателей по имеющимся эмпирическим данным.

Шаг 6. Сопоставление полученных результатов с результатами прошлых периодов.

Шаг 7. Целеполагание на основе межстранового сопоставления.

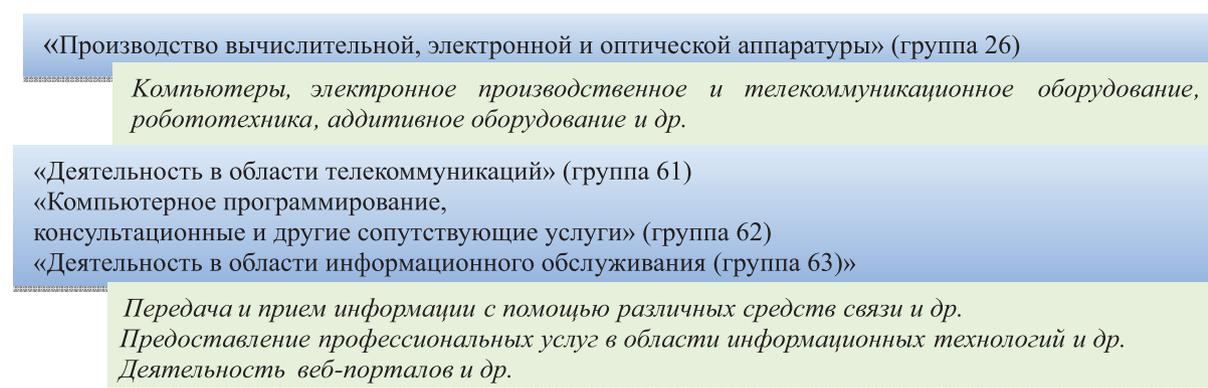
В результате исследования мирового опыта цифровой трансформации промышленности [10] установлены технико-технологические средства, используемые при цифровой трансформации ми-

ровыми индустриальными лидерами в соответствии с Международным стандартным отраслевым классификатором<sup>3</sup>, которые являются цифровыми ресурсами, необходимыми для преобразования традиционных производств в цифровые. Такие технико-технологические средства включают:

– цифровые товары (компьютеры, электронное и телекоммуникационное оборудование; электронные комплектующие; автоматизированное промышленное оборудование для производства компьютерного и телекоммуникационного оборудования; приводы виртуальной и дополненной реальности; аддитивное оборудование; робототехнику и др.);

– цифровые услуги (программное обеспечение, сбор, хранение, обработку цифровых данных; телекоммуникационные и информационные услуги; консультационные услуги, связанные с компьютерами и программным обеспечением).

Для идентификации продуцентов цифровых ресурсов проведено сопоставление производимой продукции по видам экономической деятельности<sup>4</sup> с технико-технологическими средствами для цифровой трансформации отраслей народного хозяйства, результат реализации которого – группировка видов экономической деятельности, содержащая только те из них, которые производят цифровые ресурсы (ремонт и оптовая торговля компьютерами и оргтехникой не вошли в перечень продуцентов цифровых ресурсов) (рис. 1).



**Рис. 1.** Виды экономической деятельности – продуценты цифровых ресурсов и их продукты, образующие предложение на рынке цифровых ресурсов

**Fig. 1.** Types of economic activity – producers of digital resources and their products that form the supply on the digital resources market

Анализ эмпирических данных межотраслевого баланса (Система таблиц «Затраты – Выпуск» Республики Беларусь за 2016–2020 годы)<sup>5</sup> позволил обосновать базис для расчета экономических показателей, основанных на объемах производства, импорта и потребления цифровых ресурсов в национальной экономике. Выбор исследуемого периода ограничен отсутствием данных по выделенным группам и видам экономической деятельности в более ранних версиях статистических публикаций. Так, исходя из полученных результатов развития теоретико-методологических основ цифровой экономики, установлено, что цифровая трансформация народного хозяйства сопровождается ускоренным потреблением цифровых ресурсов субъектами хозяйствования. Вместе с тем на национальном рынке цифровых ресурсов должно быть в достатке, чтобы удовлетворить растущий на них спрос. Таким образом, определены экономические показатели предложения и спроса на рынке цифровых ресурсов. Показатель предложения на национальном рынке цифровых ресурсов представляет собой совокупность объемов выпуска и импорта цифровых ресурсов, показатель спроса образуется совокупностью объемов промежуточного и конечного потребления цифровых ресурсов.

<sup>3</sup> Международная стандартная отраслевая классификация всех видов экономической деятельности // Статистические документы. 2009. Серия М, № 4/Rev.4. [https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm\\_4rev4r.pdf](https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4r.pdf).

<sup>4</sup> ОКРБ 005–2011: Виды экономической деятельности. Минск: Госстандарт, 2011. <https://www.belstat.gov.by/klassifikatory/obschegosudarstvennyye-klassifikatory-respubliki-belarus-ispolzuemye-dlya-zapolneniya-gosudarstvennoy-statisticheskoy-otchetnosti/obschegosudarstvennyy-klassifikator-okrb-005-2011-vidy-ekonomicheskoi-deyatelnosti/>.

<sup>5</sup> Система таблиц «Затраты – Выпуск» // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. Официальная статистика. <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/natsionalnye-scheta/sistema-tablits-zatraty-vypusk/>.

Предложенные показатели на национальном и международном уровнях соответствуют общедоступности статистических данных для их расчета и возможности сопоставления и агрегирования. Систематизация эмпирических данных и результаты расчета показателей предложения и спроса на национальном рынке цифровых ресурсов по экономике Республики Беларусь позволили оценить в динамике цифровые ресурсы в общих ресурсах товаров и услуг и в составе производственных ресурсов, вклад национальных цифровых продуцентов в цифровую трансформацию отраслей народного хозяйства, а также импорт страны, созданный цифровыми ресурсами.

### Результаты исследований и их обсуждение

Динамика значений показателя предложения цифровых ресурсов на национальном рынке отражает рост объемов предложения в стоимостном выражении от 9,1 млрд руб. в 2016 году до 12,8 млрд руб. в 2020-м, что соответствует годовому приросту показателя в среднем на 0,9 млрд руб. (рис. 2).

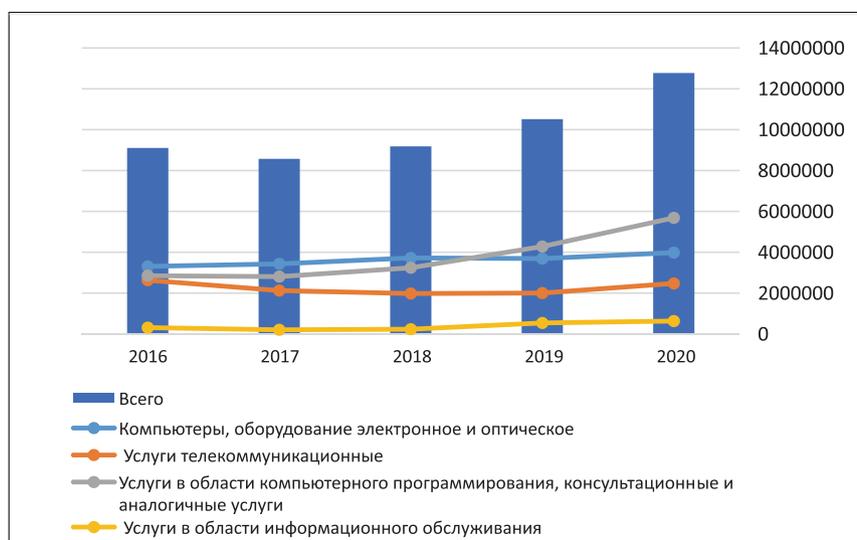
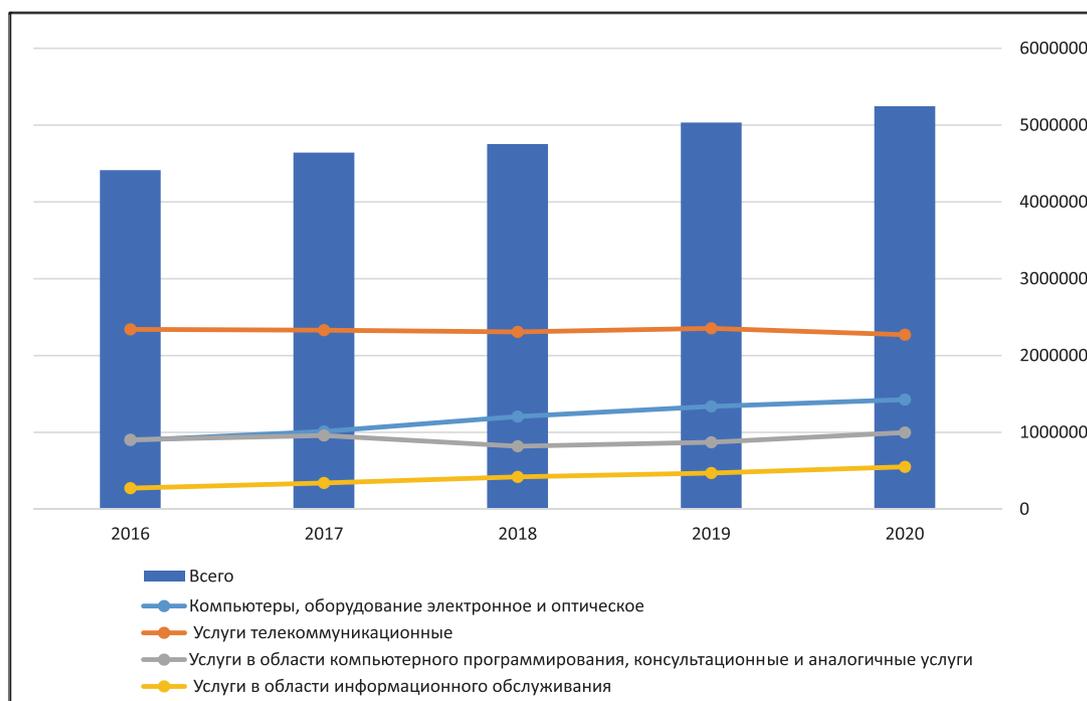


Рис. 2. Динамика предложения цифровых ресурсов на рынке Республики Беларусь в сопоставимых к 2015 году ценах, тыс. руб.

Fig. 2. Dynamics of digital resources supply on the market of the Republic Belarus in prices comparable to 2015, thousand rubles

Положительная динамика предложения цифровых ресурсов свидетельствует о происходящих процессах цифрового ресурсообеспечения отечественными цифровыми ресурсами отраслей народного хозяйства, что обусловлено приростом объемов выпуска цифровых ресурсов в среднем на 0,72 млрд руб. и их импортом в среднем на 0,19 млрд руб. Показатель спроса на рынке цифровых ресурсов, ранее не применяемый в методологиях оценки цифрового развития, отражает совокупность промежуточного и конечного спроса на цифровые ресурсы. Промежуточный спрос в межотраслевом балансе отражается как затраты предприятий (организаций) на приобретение оборотных цифровых ресурсов для производства собственной продукции, оказание услуг. В отчетный период затраты на приобретение оборотных цифровых ресурсов распределяются по видам экономической деятельности, их потребляющих. Конечный спрос в межотраслевом балансе отражается расходами на конечное потребление цифровых ресурсов домашними хозяйствами, государственными и некоммерческими организациями, обслуживающими домашние хозяйства. Конечное потребление цифровых ресурсов обусловлено государственными и частными закупками компьютеров и оборудования, покупкой специальных программных продуктов, оплатой телекоммуникационных, консультационных в области программирования и информационных услуг. Результат анализа динамики значений показателя спроса на цифровые ресурсы в Республике Беларусь представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Динамика спроса на рынке цифровых ресурсов Республики Беларусь в сопоставимых к 2015 году ценах, тыс. руб.

**Fig. 3.** Dynamics of demand in the digital resources market of the Republic of Belarus in prices comparable to 2015, thousand rubles

Результаты исследования показывают положительную динамику спроса на цифровые ресурсы в разрезе приобретения и потребления компьютеров и оборудования, компьютерного программирования и информационных услуг. При этом выявлено отсутствие динамики спроса в исследуемый период на телекоммуникационные услуги. Среднегодовой прирост значения показателя спроса на цифровые ресурсы на рынке Республики Беларусь за исследуемый период составил 0,21 млрд руб., в том числе на компьютеры, электронное и оптическое оборудование – 0,13 млрд руб., на услуги в области компьютерного программирования, консультационных и аналогичных услуг – 0,02 млрд руб., на услуги в области информационного обслуживания – 0,06 млрд руб. и отрицательный прирост спроса на телекоммуникационные услуги – 0,01 млрд руб.

Прирост предложения на рынке цифровых ресурсов республики, превышающий внутренний спрос, обусловлен внешним аутсорсингом услуг компьютерного программирования и низкими показателями использования цифровых ресурсов внутри страны, что характеризуется фрагментированным внедрением цифровых технологий белорусскими промышленными предприятиями. Низкий среднегодовой прирост промежуточного спроса, составивший 0,3 млрд руб., характеризует низкое потребление цифровых ресурсов видами экономической деятельности в Беларуси, а в совокупности значение показателя спроса на цифровые ресурсы снижается отрицательным среднегодовым приростом спроса на цифровые ресурсы конечных потребителей, составившим 0,08 млрд руб. Таким образом, на основе проведенных исследований обоснованы показатели предложения и спроса на рынке цифровых ресурсов, как новые экономические показатели цифровой трансформации народного хозяйства, ранее не применяемые в статистической методологии цифрового развития.

Направлением дальнейшего исследования определена методология целеполагания на основе анализа динамических значений предлагаемых экономических показателей предложения и спроса на рынке цифровых ресурсов за несколько лет в сопоставлении с аналогичными показателями, рассчитанными на основе международных статистических баз данных. Такая методология может быть применена для оценки темпов и стадий жизненного цикла цифровой трансформации народного хозяйства страны с целью обеспечения стратегического целеполагания и принятия обоснованных управленческих решений в отношении степени выполнения поставленных государственными целевыми программами задач.

## Заключение

1. Предлагаемый подход к идентификации продуцентов цифровых ресурсов позволил установить виды экономической деятельности, которые обеспечивают цифровыми ресурсами экономику страны в соответствии с ОКРБ 005–2011, а также товары и услуги, обладающие свойствами цифровых ресурсов в соответствии с ОКРБ 007–2012.

2. Разработанные экономические показатели предложения и спроса на цифровые ресурсы на основе межотраслевого баланса национальной экономики в динамике отражают рост внутреннего рынка цифровых ресурсов, что позволяет оценить потенциал цифровой трансформации народного хозяйства.

3. Полученные значения в сопоставлении со значениями целевых показателей цифровой трансформации экономики, обозначенными в программных целевых документах, позволяют определить степень технологической безопасности страны, оценить ее положение в сравнении со значениями прошлых периодов и в межстрановом сопоставлении с экономиками мира. Обоснованы показатели предложения и спроса на цифровые ресурсы на национальном рынке Республики Беларусь, как экономические показатели потенциала цифровой трансформации народного хозяйства. Предложен способ консолидации данных для расчета показателей объемов предложения и спроса в соответствии со статьями межотраслевого баланса (выпуск и импорт цифровых ресурсов, промежуточное и конечное их потребление).

4. Динамические значения предлагаемых экономических показателей могут быть применимы для оценки стадий жизненного цикла цифровой трансформации народного хозяйства и принятия обоснованных управленческих решений в отношении степени выполнения задач по цифровому ресурсообеспечению.

5. Апробирована методология измерения емкости национального рынка цифровых ресурсов на основе показателей предложения и спроса на цифровые ресурсы в республике. С помощью разработанных экономических показателей на базе общедоступных данных можно оценивать прирост предложения и спроса, как показателей, характеризующих цифровую трансформацию народного хозяйства страны.

## Список литературы

1. Зубрицкая, И. А. Индустрия 4.0: цифровая трансформация обрабатывающей промышленности Республики Беларусь / И. А. Зубрицкая // *Цифровая трансформация*. 2019. № 3. С. 23–38. <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2019-3-23-38>.
2. Головенчик, Г. Г. *Цифровая экономика* / Г. Г. Головенчик, М. М. Ковалев. Минск: Изд. центр Белор. гос. ун-та, 2019. 395 с.
3. Данильченко, А. В. *Цифровая трансформация обрабатывающей промышленности Республики Беларусь: тенденции и перспективы развития* / А. В. Данильченко, И. А. Зубрицкая, К. В. Якушенко. Минск: Право и экономика, 2019. 246 с.
4. Ковалев, М. М. *Цифровая экономика – шанс для Беларуси* / М. М. Ковалев, Г. Г. Головенчик. Минск: Изд. центр Белор. гос. ун-та, 2018. 299 с.
5. Карпенко, Л. И. Статистическая оценка готовности к цифровой трансформации экономики Республики Беларусь / Л. И. Карпенко, А. Б. Бельский // *Цифровая трансформация*. 2018. № 1. С. 14–25.
6. Панышин, Б. Н. *Цифровая экономика: понятия и направления развития* / Б. Н. Панышин // *Наука и инновации*. 2019. Т. 193, № 3. С. 48–55.
7. Бухт, Р. Определение, концепция и измерение цифровой экономики / Р. Бухт, Р. Хикс // *Вестник международных организаций*. 2018. Т. 13. № 2. С. 143–172. DOI: 10.17323/1996-7845-2018-02-07.
8. Портер, М. Е. *Международная конкуренция* / М. Е. Портер. М.: Междунар. отношения, 1993. 896 с.
9. Зубрицкая, И. А. *Экономическая оценка цифровой трансформации обрабатывающей промышленности* / И. А. Зубрицкая. Минск: Белор. гос. ун-т, 2021. 30 с.
10. Зубрицкая, И. А. *Мировой опыт внедрения технико-технологических средств четвертой промышленной революции: результаты экономического анализа* / И. А. Зубрицкая // *Новая экономика*. 2019. № 1. С. 80–90.

## References

1. Zubritskaya I. A. (2019) Industry 4.0: Digital Transformation of the Manufacturing Industry of the Republic of Belarus. *Digital Transformation*. (3), 23–38 (in Russian).
2. Golovenchik G. G., Kovalev M. M. (2019) *Digital Economy*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University. 395 (in Russian).
3. Danilchenko A. V., Zubritskaya I. A., Yakushenko K. V. (2019) *Digital Transformation of the Manufacturing Industry of the Republic of Belarus: Trends and Prospects of Development*. Minsk, Law and Economics. 246 (in Russian).
4. Kovalev M. M., Golovenchik G. G. (2018) *Digital Economy – a Chance for Belarus*. Minsk, Publishing Center of the Belarusian State University. 299 (in Russian).
5. Karpenko L. I., Belsky A. B. (2018) Statistical Assessment of Readiness for Digital Transformation of the Economy of the Republic of Belarus. *Digital Transformation*. (1), 14–25 (in Russian).
6. Panshin B. N. (2019) Digital Economy: Concepts and Directions of Development. *Science and Innovations*. (3), 48–55 (in Russian).
7. Bukht R., Hicks R. (2018) Definition, Concept and Measurement of the Digital Economy. *Bulletin of International Organizations*. 13 (2), 143–172. DOI: 10.17323/1996-7845-2018-02-07 (in Russian).
8. Porter M. E. (1993) *International Competition*. Moscow, International Relationships. 896 (in Russian).
9. Zubritskaya I. A. (2021) *Economic Assessment of the Digital Transformation of the Manufacturing Industry*. Minsk, Belarusian State University. 30 (in Russian).
10. Zubritskaya I. A. (2019) World Experience in the Introduction of Technical and Technological Means of the Fourth Industrial Revolution: Results of Economic Analysis. *New Economy*. (1), 80–90 (in Russian).

## Сведения об авторе

**Зубрицкая И. А.**, к. э. н., доцент кафедры маркетинга Белорусского национального технического университета

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, просп. Независимости, 165  
Белорусский национальный  
технический университет  
Тел.: +375 17 393-97-97  
E-mail: zubritskaya@tut.by  
Зубрицкая Инесса Анатольевна

## Information about the author

**Zubritskaya I. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Marketing Department of Belarusian National Technical University

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosty Ave., 165  
Belarusian National  
Technical University  
Tel.: +375 17 393-97-97  
E-mail: zubritskaya@tut.by  
Zubritskaya Inessa Anatolyevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-13-22>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 330.34; 330.356; 338.1

## РОЛЬ ЦИФРОВИЗАЦИИ В ИНТЕГРАЦИИ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ЕАЭС

Е. Г. ГОСПОДАРИК<sup>1,2</sup>, М. М. КОВАЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации  
(г. Москва, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 17.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Проанализирован современный потенциал образования и науки в странах ЕАЭС для быстрой и эффективной реализации импортозамещения высоких технологий. Построена эконометрическая модель влияния образования, науки и цифровизации на рост ВВП на панели из исторических данных за 1990–2020 годы для десяти развивающихся стран, включая государства ЕАЭС. Рассмотрено их применение для оценки влияния единого научно-образовательного пространства ЕАЭС на экономический рост стран. Выявлены главные факторы такого влияния, что позволило сформулировать наиболее перспективные пути и механизмы создания единого научно-образовательного пространства ЕАЭС, важнейший из которых – цифровизация.

**Ключевые слова:** интеграция научно-образовательного пространства, научный и образовательный потенциал, эконометрическая модель, рост ВВП, цифровые возможности, цифровизация образования.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Господарик, Е. Г. Роль цифровизации в интеграции научно-образовательного пространства ЕАЭС / Е. Г. Господарик, М. М. Ковалев // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 13–22. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-13-22>.

## THE ROLE OF DIGITALIZATION IN THE SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL SPACE INTEGRATION OF THE EAEU

S. G. GOSPODARIK<sup>1,2</sup>, M. M. KOVALEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)

Submitted 17.01.2023

**Abstract.** The article analyzes the modern potential of education and science in the EAEU countries for the rapid and effective implementation of high-tech import substitution, and also builds econometric models of the impact of education and science on GDP growth on two panels and historical data for 1990–2020 for developed and developing countries, with their subsequent application to assess the impact of the unified scientific and educational space of the EAEU on economic growth with the identification of the main factors of such influence, which made it possible to formulate the most promising ways and mechanisms for creating a unified scientific and educational space of the EAEU.

**Keywords:** integration of educational and scientific spaces, scientific and educational potential, econometric model, GDP growth, digital opportunities, digitalization of education.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Gospodarik C. G., Kovalev M. M. (2023) The Role of Digitalization in the Scientific and Educational Space Integration of the EAEU. *Digital Transformation*. 29 (1), 13–22. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-13-22> (in Russian).

## Введение

В [1–3] описан сценарий ускорения экономического роста стран ЕАЭС за счет создания механизма инновационного рывка, обеспечиваемого быстрым развитием науки и созданием собственных цифровых инноваций. Основа такого механизма – эффективная цифровая реализация триады профессора Стэнфорда г. Ицковича (государство, образование и наука, производство), которая существенно повысит инновационную активность за счет цифровых технологий взаимодействия производителей и потребителей инноваций на научно-образовательном пространстве ЕАЭС.

Человеческий капитал – один из основных факторов, влияющих на экономический рост, он играет ключевую роль в технологическом прогрессе [2]. Образование – важнейший компонент человеческого капитала, и современной наукой рассматривается как один из детерминантов устойчивого экономического роста. Эмпирические исследования подтверждают положительную роль образования в экономическом росте страны, причем высшее образование, как наиболее тесно связанное с экономикой, рассматривается в качестве ключевого фактора. Существует два подхода к количественной оценке человеческого капитала на основе расходов на образование и прироста доходов на протяжении жизни. Методики роста на базе дохода опираются на данные об образовании индивидов, а методики расходов – на источники расходов на образование (инвестиции в образование). На практике методики на основе доходов дают более высокую оценку вклада образования, чем на основе расходов. Ключевое различие заключается в объекте измерения, что ведет к расхождениям в оценках. Поэтому обычно применяется подход Барро и Ли, заключающийся в оценке влияния на рост качества трудовых ресурсов через среднюю оценку продолжительности их обучения [2].

## Панельная эконометрическая модель влияния образования на экономический рост

Если в качестве эмпирической базы для построения эконометрических моделей выбрать панель за период 1990–2020 годов из 10 развивающихся стран (Беларусь, Россия, Казахстан, Армения (страны-члены ЕАЭС), Китай, Мексика, Аргентина, Колумбия, Польша и Южная Африка), можно построить три эконометрические модели: по методу наименьших квадратов (базовая модель), с фиксированными эффектами и со случайными эффектами. Самой качественной на 1 % по уровню значимости оказалась модель с фиксированными эффектами, показавшая, что наибольшее положительное влияние на экономический рост имеют начальный уровень валового национального дохода (ВНД) на душу населения, среднее текущее и ожидаемое количество лет образования, экспорт ИКТ-товаров, число пользователей интернета и продолжительность жизни [4]:

$$\begin{aligned} \text{LOG}(GDP) = & 7,84 + 0,36\text{LOG}(GNI\_per\_capita) + 0,15\text{EXPECTED\_years\_schooling} - \\ & - 0,001\text{ICT\_goods\_exports} + 0,0003\text{INTERNET\_users} + 0,0014\text{LIFE\_expectancy} + \\ & + 0,007\text{MEAN\_year\_schooling} + 0,57\text{LOG}(GDP(-1)), \end{aligned}$$

где  $GDP_{i,t}$  – валовой внутренний продукт (ВВП)  $i$ -й страны в период  $t$ , выраженный в постоянных ценах, дол. США (2015 г.);  $GNI\_per\_capita_{i,t}$  – ВНД на душу населения  $i$ -й страны в период  $t$ , дол. (2015 г.);  $\text{EXPECTED\_years\_schooling}_{i,t}$  – средний ожидаемый уровень обучения граждан  $i$ -й страны в период  $t$ ;  $\text{ICT\_goods\_exports}_{i,t}$  – экспорт ИКТ-товаров в процентном отношении к экспорту  $i$ -й страны в период  $t$ ;  $\text{INTERNET\_users}_{i,t}$  – доля в населении пользователей интернетом  $i$ -й страны в период  $t$ ;  $\text{LIFE\_expectancy}_{i,t}$  – средняя продолжительность жизни населения при рождении в  $i$ -й стране в период  $t$ ;  $\text{MEAN\_year\_schooling}_{i,t}$  – средняя продолжительность обучения трудовых ресурсов в  $i$ -й стране в период  $t$ .

Предложенная модель позволила оценить вклад образования и цифровизации в рост ВВП стран-членов ЕАЭС (Кыргызстан не был включен в модель из-за существенных отличий в уровне образования). Более глубокий анализ по данной модели экономического роста (с учетом экспорта

ИКТ-услуг, ИКТ-инвестиций) показал, что его темпы существенно зависят от успешности реализации в стране концепции цифровой трансформации экономики.

### Сравнительный анализ уровня образования в странах ЕАЭС

Модель для инновационного цифрового рывка показала, что требуются существенное повышение и выравнивание качества образования в странах ЕАЭС за счет формирования единого образовательного пространства с высокой мобильностью преподавателей и студентов, их нацеленностью на совместное инновационное и цифровое предпринимательство по принципу «Совместная учеба русских, казахов, белорусов, армян и кыргызов сегодня – совместный бизнес завтра». Разумеется, при условии, что уже, начиная со школы и вуза, молодежь будут обучать экономике, финансам и ведению бизнеса по более-менее гармонизированным программам для лучшего понимания друг друга.

*Продолжительность обучения в ЕАЭС.* В докладах ООН отмечается, что уровень грамотности населения стран ЕАЭС высок и составил 99,7 %, это на 21 % больше среднего уровня в мире. Согласно глобальному рейтингу Индекса человеческого развития за 2022 г., у России 0,822 балла (52-е место), Казахстана – 0,811 (56-е), Беларуси – 0,808 (60-е), Армении – 0,759 (85-е), у Кыргызстана – 0,692 балла (118-е). По субиндексу образования ООН, основанному на продолжительности обучения текущих и будущих трудовых ресурсов, Беларусь находится в лидерах относительно всех стран ЕАЭС и занимает 32-е место (рис. 1). Заметим, что текущая продолжительность обучения в мире наибольшая у Германии – 14,1 года, а ожидаемая – у Австралии (21,1); средняя в мире – 8,6 лет, ожидаемая – 12,8 лет у стран с высочайшим человеческим развитием, к которым относятся Беларусь, Россия, Казахстан. Важна не только продолжительность обучения трудовых ресурсов страны, но и его качество. Сегодня в мире существует единственный измеритель – программа PISA (табл. 1), которая изучает способности подростков применять полученные знания, проявляя творческие навыки и критическое мышление. Это позволяет понять, будет ли страна конкурентоспособной, когда подрастающее поколение станет трудовым ресурсом.

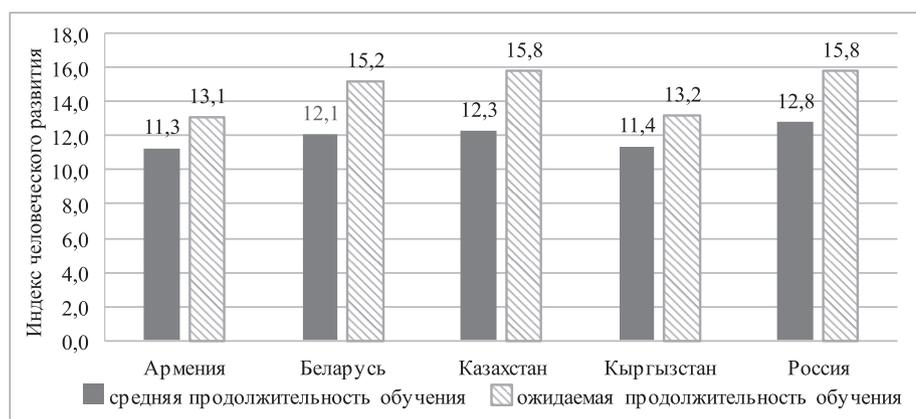


Рис. 1. Уровень образования в странах ЕАЭС согласно Индексу человеческого развития ООН за 2021–2022 годы (расчеты авторов по базе данных ООН)

Fig. 1. The level of education in the EAEU countries according to the UN Human Development Index for 2021–2022

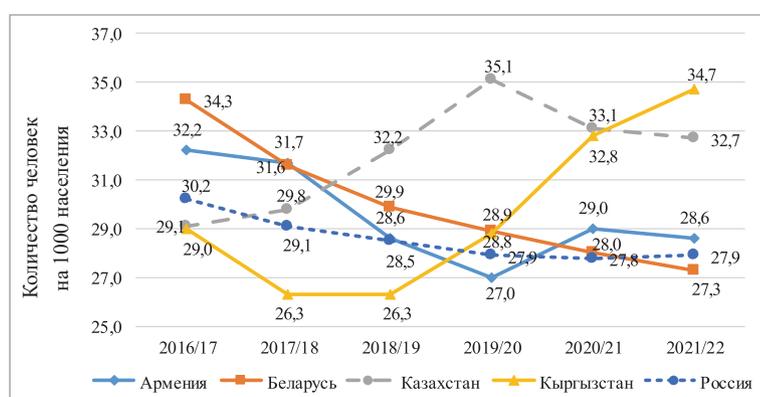
Таблица 1. Балл грамотности школьников по международной программе PISA за 2018 год  
Table 1. The literacy score of schoolchildren according to the PISA international program for 2018

Страна/Country	Балл грамотности		
	Чтение/Reading	Математика/Mathematics	Естественные науки/ Natural Sciences
Китай (мировой лидер)	555 (1)	591 (1)	590 (1)
Беларусь	474 (36)	472 (39)	471 (38)
Казахстан	387 (70)	423 (55)	397 (70)
Россия	479 (30)	488 (31)	478 (34)

Примечание – В скобках – место/In parentheses – place (расчеты авторов по базе данных ООН, <https://hdr.undp.org/>).

Из табл. 1 видно, что уровень знаний школьников в Беларуси и России практически идентичен среднему по развитым странам ОЭСР – 490. Заметим, что у США в этом рейтинге 38-е место. Армения и Кыргызстан не принимали участия в программе PISA.

*Профессиональное образование.* Уровень охвата населения профессиональным образованием оценивают по показателю численности обучающихся в организациях профобразования на тысячу населения (рис. 2). Число профессиональных образовательных организаций в ЕАЭС в 2021/2022 учебном году – 5431, из них: 81 % – среднее и 19 % – высшее образование (вузы). С 2016-го количество вузов в Армении и России уменьшилось на 10 % за счет укрупнения, а в Кыргызстане увеличилось с 51 до 60.



**Рис. 2.** Динамика численности обучающихся в профессиональных образовательных организациях на тысячу населения (расчеты авторов по статистике ЕЭК, <http://www.eurasiancommission.org>)

**Fig. 2.** Dynamics of the number of students in professional educational organizations per thousand population

Важен также показатель числа студентов вузов на 1000 занятых в экономике, средний для ЕАЭС – 60, в Армении – 78, Беларуси – 53, Казахстане – 70, Кыргызстане – 91, России – 57 человек. Динамика выпуска специалистов из образовательных организаций в расчете на тысячу населения за последние пять лет была неоднозначная: с одной стороны, выпуск специалистов из учреждений среднего профессионального образования в разрезе стран ЕАЭС относительно 2016 года увеличился на 4 %, с другой – наблюдалось сокращение выпускников вузов на 13 %. При этом в 2021-м количество выпускников вузов на тысячу населения было наибольшим: в Казахстане – 9,2 чел. (при среднем по ЕАЭС 6,1 чел.), в Беларуси – 6,6. В госвузах Беларуси, Казахстана и России около половины бюджетных студентов, Армении – 19 %, Кыргызстана – 13 %. Доля платных студентов в вузах Армении – 15,8 %, Беларуси – 44,9, Казахстана – 37,4, Кыргызстана – 11,4, России – 48,3 %. Цифры показывают, что только Беларусь и Россия предоставляют возможность учиться в вузе практически всем желающим, без учета будущего трудоустройства.

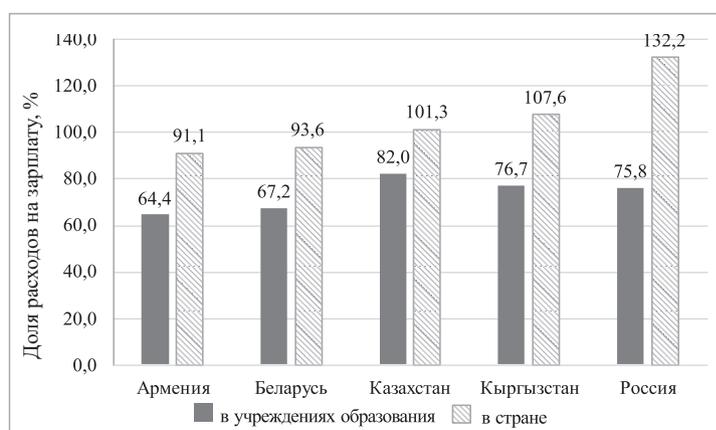
*Миграция студентов в ЕАЭС.* Очень важный показатель для интеграции образовательного пространства ЕАЭС – численность студентов, обучавшихся в странах-партнерах ЕАЭС, благодаря которому можно увидеть, что за шесть лет существования ЕАЭС в Армении и Казахстане число студентов из других евразийских вузов увеличилось; остальные страны-члены свернули программы евразийской мобильности студентов, особенно Кыргызстан. Если в 2015/2016 учебном году после обучения у партнеров по ЕАЭС домой вернулись 102 568 студентов, то в 2020/2021 – только 91 854 студента, причем сокращение произошло в основном за счет России (с 91 120 до 82 184), у Беларуси – с 1895 до 1627 студентов, у Казахстана число студентов увеличилось с 1991 до 2049. Доля иностранных студентов из разных стран мира по отношению ко всем студентам вузов в 2021/2022 учебном году наибольшая в Кыргызстане – 35,1 % (основная масса из соседнего Узбекистана) и Беларуси – 9,5 %, в России – 7,9 %, Армении – 7,1 %, в Казахстане – 4,7 %.

*Уровень образования трудовых ресурсов в странах ЕАЭС.* В 2020 году численность трудовых ресурсов ЕАЭС составила 93,1 млн чел. Наибольшая доля занятого трудового населения, имеющего высшее (включая незаконченное) образование, – 34,9 %, среднее и общее среднее профобразование – 27,1 и 16,2 % соответственно, не имеющего полного среднего образования, – 3,7 %. Самая высокая доля среди занятого трудового населения с высшим образованием в Казахстане – 40,5 %,

в Беларуси и России – по 35 %, Армении – 34 %, Кыргызстане – 22 %. Среди безработных ЕАЭС доминируют лица со средним общим образованием – 28,0 %, высшим (включая незаконченное) – 23,4 %, средним профобразованием – 23,0 %. В ковидном 2020 году отмечалась негативная тенденция опережающего роста численности безработных, имеющих высшее образование, однако в 2021-м ситуация улучшилась, и уровень безработицы среди них стал самым низким – 3,4 %. При этом достаточно высокий уровень безработицы отмечается среди лиц, не имеющих полного среднего образования (12,8 %) и имеющих среднее общее образование (9,1 %).

*Расходы на образование и уровень заработной платы.* Качество и охват образованием во многом определяются объемом государственного финансирования. Анализируя расходы консолидированного бюджета каждой из стран за последние пять лет, можно сделать вывод, что удельный вес расходов на образование в ВВП практически не изменяется и составляет: в Армении – 2,7 % (159-я в мире), Беларуси – 5,4 % (76-я), Казахстане – 5,3 % (157-й), Кыргызстане – 6,1 % (31-й), в России – 4,0 % (120-я), т. е. по расходам на образование как доле в ВВП ЕАЭС отстает от развитых стран (Норвегия – 8,7 %, Исландия – 8,0 %, Чили – 7,9 %, Великобритания – 6,6 %, США – 6,0 %, Франция – 5,9 % (средний показатель за 2016–2020 годы). Мировой лидер по расходам на образование Куба – около 18 % (данные ЕАЭС и ООН).

В системе образования главная доля бюджетных расходов идет на зарплату. Анализ отношения в 2021-м среднемесячной заработной платы в образовании к средней по стране показал, что в Армении и Беларуси зарплата работников сферы образования на треть меньше средней заработной платы по стране (даже в вузах), в то время как в России и Кыргызстане – только на 23,3 и 23,7 %, а в Казахстане – всего на 17,4 %. Причем у вузовских преподавателей этих трех стран зарплаты выше средней по стране (рис. 3); в России зарплата в вузах в 2021 году превышала среднюю по стране в 1,3 раза и только в Беларуси и Армении составила 0,9 раза к средней по стране.



**Рис. 3.** Отношение среднемесячной заработной платы в учреждениях среднего и высшего образования к заработной плате по стране в 2021 году, %

**Fig. 3.** The ratio of the average monthly salary in institutions of secondary and higher education to the national average salary in 2021, %

Зарплата отчасти коррелирует с производительностью труда – на одного преподавателя в вузах Кыргызстана и России приходится 18 студентов, в Казахстане и Армении – 12, в Беларуси – 11. В абсолютных цифрах среднемесячная зарплата в образовании в марте 2022-го составила: в Армении – 267 дол., Беларуси – 334 дол., Казахстане – 475 дол., Кыргызстане – 171 дол., в России – 446 дол. Очевидно, что добиться повышения компетенций выпускников вузов без увеличения зарплаты до уровня 1,5 средней по стране, невозможно.

*Рейтинг усилий стран ЕАЭС по повышению уровня образования.* Методика рейтинга основана на линейном ранжировании и состоит из четырех этапов: отбор показателей, переход к безразмерным показателям, построение рейтингового (результатирующего) критерия, упорядочение в линейный список (рэнкинг). Отобраны следующие показатели:

- доля работников образования от занятого населения, %;
- расходы бюджета на образование на душу населения, дол.;
- зарплата в образовании к средней по стране, %;

- расходы консолидированного бюджета на образование, % от ВВП;
- численность обучающихся в вузах в расчете на тысячу занятых;
- выпуск специалистов из вузов в расчете на тысячу населения.

Формула шкалирования перехода к безразмерным показателям стандартная – (показатель-минимальный показатель)/(максимальный показатель-минимальный показатель). Рейтинговый критерий – сумма баллов шкалированных показателей. В табл. 2 представлены результаты ранжирования стран ЕАЭС за 2021/2022 учебный год по усилиям, направленным на повышение уровня образования. Лидирующую позицию занимает Казахстан. Следует подчеркнуть, что рейтинг оценивает не достигнутый уровень, а текущие ресурсы (показатели).

**Таблица 2.** Рейтинг стран ЕАЭС по усилиям в улучшении качества образования за 2021/2022 учебный год  
**Table 2.** Rating of the EAEU countries on efforts to improve the quality of education for the 2021/2022 academic year

Страна	Место	Доля работников образования в занятом населении, % (балл)	Расход бюджета на образование на душу населения, дол. (балл)	Зарплата в образовании к средней по стране, % (балл)	Доля расходов на образование в ВВП, % (балл)	Численность обучающихся в вузах в расчете на 1000 занятого населения (балл)	Выпуск специалистов из вузов в расчете на 10 тыс. населения (балл)	Сумма баллов
Казахстан	1	12,7 (1)	303 (0,74)	82,0 (1)	5,3 (0,76)	70 (0,34)	9,2 (1)	484
Кыргызстан	2	9,4 (0)	88 (0)	76,7 (0,7)	6,1 (1)	91 (1)	5,4 (0)	2,70
Беларусь	3	10,4 (0,3)	312 (0,78)	67,2 (0,16)	5,4 (0,79)	53 (0)	6,6 (0,32)	1,35
Россия	4	9,5 (0,03)	377 (1)	75,8 (0,65)	4,0 (0,38)	57 (0,11)	5,8 (0,11)	2,28
Армения	5	10,9 (0,45)	105 (0,36)	64,4 (0)	2,7 (0)	78 (0,66)	7,3 (0,5)	1,97

*Примечание* – Расчеты авторов по статистике ЕЭК (<http://www.eurasiancommission.org>).

Высокие позиции Казахстана и Кыргызстана объясняются необходимостью догонять по уровню образования лидеров по образовательному потенциалу – Россию и Беларусь. У Беларуси малое отношение обучающихся к занятым объясняется демографическим спадом среди обучающихся.

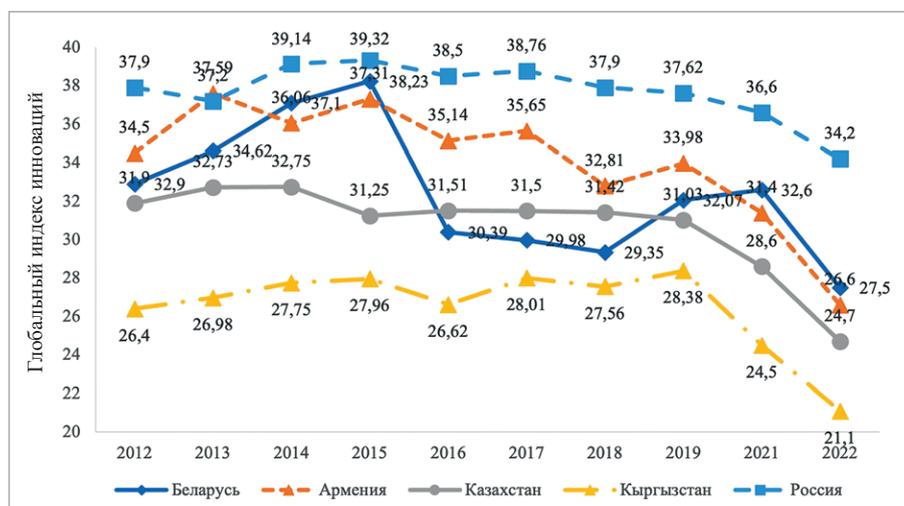
### Сравнительный анализ научного потенциала стран ЕАЭС

Сложившаяся в государствах-членах ЕАЭС ситуация в области инновационно-технологического развития характеризуется двумя важнейшими трендами:

- научным потенциалом, который дает невысокие инновационные результаты и, как следствие, низкую экономическую отдачу с точки зрения экспорта высокотехнологичной продукции и интеллектуальной ренты получения патентов и цитирования работ, что подтверждает Глобальный индекс инноваций GII;
- отсутствием в рамках неоцифрованных моделей национальных инновационных систем возможностей для наращивания государственного финансирования НИОКР и инноваций и для повышения отдачи от этих расходов.

Доля частных инвестиций в инновации в странах ЕАЭС составляет 57,5 % от всех затрат (лидеры – Беларусь (64,3 %) и Россия (57,8 %)). Совместная разработка инноваций практически отсутствует, за исключением их трансфера из России вместе с переехавшими в Армению и Казахстан в 2022 году специалистами. Индекс GII для стран ЕАЭС (рис. 4) рассчитывается как взвешенная сумма двух групп показателей. Первая группа (располагаемые ресурсы и условия для инноваций, Innovation Input – инновационный потенциал) включает пять блоков: институты, человеческий капитал и исследования, инфраструктуру, развитие внутреннего рынка, развитие бизнеса; вторая (результаты осуществления инноваций, Innovation Output) – два блока: развитие технологий и экономику знаний, результаты творческой деятельности.

В табл. 3 представлены важнейшие показатели стран-членов ЕАЭС. Так, Беларусь имеет наилучшие инновационные результаты по внедрению стандартов ISO 9001 (3-е место в мире), экспорту ИКТ-услуг (10-е), росту производительности труда (30-е) и сложности экспорта (31-е).



**Рис. 4.** Глобальный индекс инноваций для ЕАЭС за 2012–2022 годы  
(собственная разработка авторов на основе GII, <https://www.wipo.int>)  
**Fig. 4.** Global innovation index for the EAEU for 2012–2022

**Таблица 3.** Показатели инновационных результатов стран-членов ЕАЭС в GII-2022  
**Table 3.** Indicators of the innovative results of the EAEU member states in GII-2022

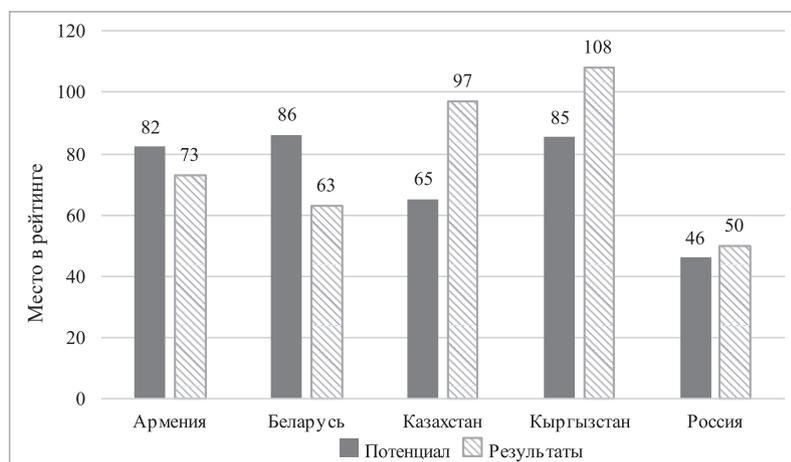
Наименование показателя	Значение показателя (место в мире)				
	Армения	Беларусь	Казахстан	Кыргызстан	Россия
Количество патентов на 1 млрд ВВП по ППС	1,6 (46)	2,2 (32)	1,8 (39)	2,1 (34)	5,9 (17)
РСТ-патенты	0,1 (65)	0,1 (63)	0,1 (73)	0 (101)	0,2 (46)
Количество научно-технических статей на 1 млрд ВВП	19,4 (49)	6,8 (104)	3,9 (117)	8,7 (98)	10,3 (85)
<i>h</i> -индекс цитирования	9,9 (73)	9,8 (75)	5,3 (93)	3,2 (116)	37,7 (25)
Рост производительности труда	2,8 (23)	2,2 (30)	2,2 (31)	1,7 (44)	2,0 (35)
Внедрение ISO 9001 на 1 млрд ВВП по ППС	0,9 (108)	37,5 (3)	0,9 (109)	0,4 (121)	1,0 (105)
Доля высокотехнологичной промышленности	5,4 (98)	29,8 (45)	15,3 (75)	2,1 (109)	22,8 (56)
Сложность производства и экспорта	35,3 (74)	61,1 (31)	34,1 (76)	40,7 (64)	44,5 (52)
Экспорт ИКТ-услуг	7,5 (9)	7,5 (10)	0,3 (115)	0,4 (102)	1,7 (70)
Расходы на программы, % ВВП	2,7 (113)	5,0 (41)	2,9 (111)	5,4 (31)	4,7 (52)
Высокотехнологичный экспорт	0,7 (84)	2,2 (56)	5,2 (36)	0,8 (79)	1,9 (60)
Экспорт креативных товаров	0,8 (52)	0,7 (53)	0,2 (79)	0,1 (88)	0,4 (67)

Примечания.

1. ППС – паритет покупательной способности.
2. Расчеты авторов на основе <https://www.globalinnovationindex.org/gii-2022-report#>.

Однако белорусские ученые мало публикуются в международных журналах, входящих в базы Web of Science и Scopus (104-е и с *h*-индексом – 75-е места). С национальным патентованием неплохо – 32-е место, но по международным патентам (РСТ) Беларусь занимает только 63-е место. Вместе с тем практически по всем ключевым показателям результатов инноваций, кроме патентов и публикаций, республика опережает страны ЕАЭС, включая Россию.

Лидером среди стран ЕАЭС по GI является Россия, аутсайдером – Кыргызстан. В целом улучшение индекса GI в странах ЕАЭС наблюдалось только до 2015 года, особенно по инновационной деятельности. Другие страны мира инновационные результаты внедряют быстрее. Наилучшие показатели по отношению (баллы за результаты)/(баллы за потенциал) имеют лидер рейтинга Швейцария и стремительно строящие экономику знаний Китай, Чехия, Вьетнам, Армения. Недоиспользован инновационный потенциал у Канады, Норвегии, Казахстана, России. На рис. 5 представлен рейтинг стран ЕАЭС по потенциалу и результатам инноваций.



**Рис. 5.** Сравнение стран-членов ЕАЭС по инновационному потенциалу (input) и инновационному результату (output) в GUI-2022 (расчеты авторов на основе GUI, <https://www.globalinnovationindex.org>)

**Fig. 5.** Comparison of the places of the EAEU member states in terms of innovative potential (input) and innovative result (output) in the GUI-2022

Главной составляющей инновационного потенциала любой страны ЕАЭС являются ученые и специалисты, занятые НИОКР. В 2022 году их общая численность составила 719,2 тыс. чел., или 0,77 % от занятых в ЕАЭС, что меньше данного показателя за 2016-й на 6 %. Наибольшее число научных работников сосредоточено в России (0,88 % от занятых) и Беларуси (0,51 %). Основу научно-технического потенциала ЕАЭС составляют исследователи (53 %), вместе с техниками и вспомогательным персоналом – 62,1 % и 19,6 % соответственно. Внутренние затраты по ЕАЭС на НИОКР в 2021 году достигли 18,3 млрд дол., что составило 0,9 % ВВП. При этом наименьший удельный вес имеют Армения (0,21 %), Казахстан (0,13 %) и Кыргызстан (0,09 %). Показатели Беларуси и России также меньше средней нормы развитых стран, стремящихся к 3 % ВВП. В области привлечения в НИОКР иностранных источников финансирования страны имеют показатели, млн дол.: Армения – 1,0, Беларусь – 29,5, Казахстан – 4,9, Кыргызстан – 0,2, Россия – 341,2 (данные ЕЭК). В табл. 4 приведены показатели рейтинга стран ЕАЭС по стимулированию НИОКР в 2021 году, которые отражают внимание государства к развитию инноваций. Лидеры по сумме баллов – Россия и Беларусь, последние места – у Армении и Кыргызстана.

**Таблица 4.** Рейтинг стран ЕАЭС по стимулированию развития НИОКР в 2021 году  
**Table 4.** Rating of the EAEU countries on stimulating the development of R&D in 2021

Страна	Место	Внутренние затраты на НИОКР, % от ВВП (балл)	Затраты на технологические инновации, % к ВВП (балл)	Численность персонала, занятого НИОКР, % к занятому населению (балл)	Сумма баллов
Россия	1	0,99 (1)	1,82 (1)	0,91 (1,00)	3,00
Беларусь	2	0,47 (0,47)	0,07 (0,04)	0,51 (0,69)	1,16
Казахстан	3	0,13 (0,05)	0,93 (0,51)	0,23 (0,31)	0,87
Армения	4	0,21 (0,14)	0	0,38 (0,51)	0,65
Кыргызстан	5	0,08 (0)	0,86 (0,47)	0,17 (0)	0,47

### Цифровизация научно-образовательного пространства ЕАЭС

Цифровизации научно-образовательных процессов посвящены труды [5–8]. Рассмотрим цифровизацию национальных инновационных систем (НИС). В основе НИС лежит теория триады Г. Ицковича, которая при разработке и внедрении инноваций описывает эффективные взаимодействия: государства (G – governance), знаний (K – knowledge) и бизнеса (B – business). Цифровиза-

ция взаимодействия этих трех компонент существенно изменяет и переносит в интернет-пространство цифровую экосистему<sup>1</sup> сотрудничества для совместных инноваций, т. е. инициатива от государства и научно-образовательных организаций переходит к десяткам малых цифровых посредников, владеющих порталами знаний и онлайн-сервисами, объединяющими субъектов для совместных инноваций, в том числе трансграничных. Привлечение зарубежных ученых и проектировщиков с помощью цифровых платформ превращает триаду G2K2B в тетраду G2K2B2EAЭС, т. е. интегрирует НИС в евразийский обмен знаниями и инновациями. От цифровизации науки и инноваций в наибольшей степени выигрывают евразийское инновационное сотрудничество и его эффективность. Онлайн-коммуникации в сетях знаний позволяют быстро найти новые идеи для инноваций и партнеров для их реализации. Государство нормативно регламентирует процесс и стимулирует его, создавая удобный и открытый доступ предприятий к знаниям и инновациям с соблюдением условий коммерческой тайны. Типичный пример – китайская национальная инфраструктура знаний CNKI ([www.cnki.net](http://www.cnki.net)), которой пользуются тысячи университетов мира из более чем 50 стран.

Создание цифровой экосистемы взаимодействия научно-образовательных организаций ЕАЭС (производителей инноваций) и предприятий и бизнеса (потребителей инноваций) должно быть направлено на формирование единого рынка трансфера инноваций. Несмотря на принятие Основных направлений цифровой повестки ЕАЭС до 2025 года для стимулирования формирования единой цифровой экосистемы инновационного развития ЕАЭС, сделано пока мало. В условиях внешнего давления создание на базе цифровой экосистемы единого научно-образовательного пространства за счет нивелирования различий в национальных инновационных системах позволит ускорить разработку прорывных кооперативных проектов.

### Заключение

1. Главная инновационная проблема всех стран ЕАЭС – невысокая отдача реальному сектору НИОКР. Качество национальных инновационных систем требует улучшения. Интеграция научно-образовательного пространства ЕАЭС с помощью цифровых платформ может способствовать разработке и реализации общей стратегии цифровизации, включающей отчисление определенного процента от таможенных платежей в общий инновационный фонд, финансирующий совместные стартапы по высокотехнологичным направлениям для производства остро необходимой импортозамещающей продукции (например, чипы) и внедрения цифровых услуг.

2. Вторая проблема – невысокий спрос на собственные инновации и цифровые технологии. Предпочтение отдается заимствованию иностранных технологий: Казахстан, Армения и Кыргызстан делают это и сегодня. Спрос на инновации существенно повысил бы необходимость направления части прибыли, освобождаемой от налогов, на инновационные и цифровые цели предприятия (как в Китае).

3. Государственные затраты на образование в большинстве стран ЕАЭС следует увеличить до средней нормы развитых и быстроразвивающихся стран – в 6 % ВВП, поднять зарплату занятых в образовании до средней по стране. Необходимо также увеличить долю затрат на высшее образование, отдача третичного образования для роста ВВП быстрее и больше. Повышение зарплаты учителей и преподавателей вузов автоматически снимет существующие проблемы их нехватки и уровня квалификации.

4. При существенном отставании в цифровом развитии стран ЕАЭС от инновационного ядра мира, представленного США, Китаем, Евросоюзом и Израилем, правильной будет тесная интеграция с ушедшим в цифровизации далеко вперед новым мировым лидером Китаем.

### Список литературы

1. Господарик, Е. Г. Единое инновационное пространство ЕАЭС – фундамент устойчивого экономического роста / Е. Г. Господарик, М. М. Ковалев // Наука и инновации. 2022. Т. 227, № 1. С. 50–55.

<sup>1</sup> Термин «экосистема» в экономику заимствован еще в 1993 году из биологии экспертом по менеджменту Дж. Муром для обоснования конкуренции на основе не только соперничества, но и сотрудничества заинтересованных участников рынка, позднее ученые много внимания уделяли инновационным экосистемам, пока совсем недавно не появился термин «цифровая экосистема», понимаемый по-разному, но всегда как форма эволюционного взаимовыгодного взаимодействия (win-win) субъектов экономического процесса посредством цифровых платформ и сетей.

2. Господарик, Е. Г. ЕАЭС-2050: глобальные тренды и евразийская экономическая политика / Е. Г. Господарик, М. М. Ковалев. Минск: Изд. центр БГУ, 2015. 152 с.
3. Господарик, Е. Г. Перспективы ЕАЭС: экономический рост при инновационном рывке / Е. Г. Господарик, М. М. Ковалев // Банкаўскі веснік. 2020. № 4. С. 39–48.
4. Господарик, Е. Г. Моделирование влияния уровня образования и цифровизации на экономический рост / Е. Г. Господарик, В. Д. Ермак // Журнал Белорусского государственного университета. Экономика. 2022. № 2. С. 81–92.
5. Ковалев, М. М. Образование для цифровой экономики / М. М. Ковалев // Цифровая трансформация. 2018. № 1. С. 37–42.
6. Головенчик, Г. Г. Современные тенденции цифрового реформирования образования / Г. Г. Головенчик // Цифровая трансформация. 2020. № 4. С. 5–20. <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-4-5-20>.
7. Science, Technology and Innovation Outlook. OECD, 2021. 207 p.
8. Ковалев, М. М. Китайский опыт международного научно-технического сотрудничества и его вклад в экономику знаний / М. М. Ковалев, Хэ Яньхай // Наука и инновации. 2022. Т. 232, № 6. С. 46–52.

## References

1. Gospodarik C. G., Kovalev M. M. (2022). The Unified Innovation Space of the EAEU is the Foundation of Sustainable Economic Growth. *Science and Innovations*. 227 (1), 50–55 (in Russian).
2. Gospodarik C. G., Kovalev M. M. (2015) *The EAEU-2050: Global Trends and Eurasian Economics Policy*. Minsk, Belarusian State University Publ. 152 (in Russian).
3. Gospodarik C. G., Kovalev M. M. (2020) Prospects for the Eurasian Economic Union: Economic Growth under Innovative Burst. *Bank Bulletin*. (4), 39–48 (in Russian).
4. Gospodarik C. G., Yermak V. D. (2022) Modelling the Impact the Level of Education and Digitalisation on Economic Growth. *Journal of the Belarusian State University. Economics*. (2), 81–92 (in Russian).
5. Kovalev M. M. (2018) Education for the Digital Economy. *Digital Transformation*. (1), 37–42 (in Russian).
6. Goloventchik G. G. (2020) Current Trends in Digital Education Reform. *Digital Transformation*. (4), 5–20. <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-4-5-20> (in Russian).
7. *Science, Technology and Innovation Outlook*. OECD, 2021. 207.
8. Kovalev M. M., He Yanhai (2022). Chinese Experience of International Scientific and Technical Cooperation and its Contribution to the Knowledge Economy. *Science and Innovations*. 232, (6), 46–52 (in Russian).

## Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи / All authors equally contributed to the writing of the article.

## Сведения об авторах

**Господарик Е. Г.**, к. э. н., доцент, заведующая кафедрой аналитической экономики и эконометрики Белорусского государственного университета; профессор Департамента бизнес-аналитики Финансового университета при правительстве Российской Федерации

**Ковалев М. М.**, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры аналитической экономики и эконометрики Белорусского государственного университета

## Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,  
г. Минск, просп. Независимости, 4  
Белорусский государственный университет  
Тел.: +375 17 282-22-84  
E-mail: [gospodarik@bsu.by](mailto:gospodarik@bsu.by)  
Господарик Екатерина Геннадьевна

## Information about the authors

**Gospodarik C. G.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head at the Department of Analytical Economics and Econometrics of the Belarusian State University; Professor at the Department of Business Analysis of the Financial University under the Government of the Russian Federation

**Kovalev M. M.**, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Department of Analytical Economics and Econometrics of the Belarusian State University

## Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosty Ave., 4  
Belarusian State University  
Tel.: +375 17 282-22-84  
E-mail: [gospodarik@bsu.by](mailto:gospodarik@bsu.by)  
Gospodarik Catherine Gennadievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-23-31>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 339.97+338:004

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ГРАМОТНОСТИ ПЕРСОНАЛА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

В. С. КНЯЗЬКОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 27.01.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Рассмотрена проблема оценки эффективности повышения цифровой грамотности персонала в условиях цифровой трансформации. Представлен краткий обзор исследований, проведенных к настоящему времени по исследуемой тематике. Выделены две основные тенденции, характеризующие современный рынок труда, – замещение человека машиной и нехватка кадров с требуемым на данном этапе развития информационно-коммуникационных технологий уровнем цифровой грамотности. Предложен алгоритм оценки экономической эффективности инвестиций в повышение цифровой грамотности сотрудников организации. Структурно алгоритм состоит из оценки затрат на повышение цифровой грамотности сотрудников, а также включает методические подходы к оценке интегрального эффекта от реализованных мероприятий. Предложена методика расчета экономического, научно-технического, экологического, социального эффектов, а также итогового показателя, характеризующего эффективность повышения цифровой грамотности сотрудников.

**Ключевые слова:** цифровая грамотность, цифровые навыки, цифровизация, цифровая экономика, цифровая трансформация, информационно-коммуникационные технологии.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Князькова, В. С. Оценка эффективности повышения цифровой грамотности персонала в условиях цифровой трансформации / В. С. Князькова // 2023. Т. 29, № 1. С. 23–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-23-31>.

## EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF INCREASING THE DIGITAL LITERACY OF PERSONNEL IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION

VERONIKA S. KNYAZKOVA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27.01.2023*

**Abstract.** The problem of evaluating the effectiveness of increasing the digital literacy of personnel in the context of digital transformation is considered. A brief review of studies conducted to date on the subject under study is presented. Two main trends that characterize the modern labor market - the replacement of a person by a machine and the lack of personnel with the level of digital literacy required at this stage of development of information and communication technologies are identified. An algorithm for assessing the economic efficiency of investments in improving the digital literacy of employees of an organization is proposed. Structurally, the algorithm consists of assessing the costs of improving the digital literacy of employees, and also includes methodological approaches

to assessing the integral effect of the implemented activities. A method for calculating the economic, scientific, technical, environmental, social effects, as well as the final indicator characterizing the effectiveness of increasing the digital literacy of employees is proposed.

**Keywords:** digital literacy, digital skills, digitalization, digital economy, digital transformation, information and communication technologies.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Knyazkova V. S. (2023) Evaluation of the Effectiveness of Increasing the Digital Literacy of Personnel in the Context of Digital Transformation. *Digital Transformation*. 29 (1), 23–31. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-23-31> (in Russian).

## Введение

Развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) явилось своего рода катализатором процессов цифровой трансформации, которые, как ожидается, принесут новые возможности для социально-экономического роста стран и регионов мира, устойчивого развития организаций, совершенствования личностного потенциала людей. Ключевыми характеристиками этих процессов являются их высокая технологичность, значительная степень распространения и инклюзии во все сферы жизни человека и общества, а также сверхскорости процессов жизненного цикла внедряемых инноваций. Так, в 2015 году Gartner называла в качестве ключевых технологий года интернет вещей, 3D-печать, умные машины, облачные технологии, а уже в начале 2023-го эти технологии для нас кажутся привычными, многие организации интегрировали их в свои бизнес-процессы, несмотря на то, что прошло совсем немного времени. Сегодня Gartner в качестве технологических трендов на текущий год называет построение цифровых иммунных систем, облачные технологии для цифровых платформ, метавселенную, адаптивный искусственный интеллект<sup>1</sup> – уровень этих технологий существенно выше тех, которые были заявлены в качестве технологий-лидеров немногим более пяти (!) лет назад.

Несомненно, такие темпы технологического развития требуют существенной материально-технической базы. Но без человека с его творческими способностями, знаниями, навыками, опытом, системой ценностей и устремлений эти материальные ресурсы, по сути, бесполезны. Они бесполезны без людей, обладающих определенными отличительными, специфическими для процессов цифровизации и информатизации знаниями и навыками. Данный аспект обычно рассматривается с двух точек зрения. Во-первых, проводятся многочисленные исследования, посвященные вопросам трансформации рынка труда, изменения ландшафта профессий, размеров заработных плат, численности персонала и т. п. Они выполняются как под эгидой международных организаций, всемирно известных компаний, профессиональных СМИ (например, Всемирный экономический форум, ОЭСР (Организации экономического сотрудничества и развития), McKinsey, Forbes, РБК и пр.), так и в рамках научных работ, проводимых исследователями разных стран мира. Указанными вопросами занимались зарубежные ученые D. Acemoglu, M. Arntz, D. Autor, T. Berger, H. Entorf, M. Doms, T. Dunne. Среди российских и белорусских исследователей можно отметить Т. Н. Беляцкую, А. В. Бабкина, Б. Н. Паньшина, Н. А. Шматко, Т. А. Ткалич, Л. В. Лapidус.

Во-вторых, рассматриваются непосредственно навыки с точки зрения анализа их качественных характеристик, востребованных на рынке труда как сегодня, так и в ближайшей перспективе. Наиболее полно специфику данного исследовательского аспекта отражают публикации, выполненные под патронажем ОЭСР. Это и непосредственно работы, исследующие тот «набор» компетенций и навыков, который необходим в условиях цифровой трансформации и который формирует цифровую грамотность, и ежегодные обзоры, включающие как результаты исследования существующего уровня цифровой грамотности населения, так и рекомендации относительно направлений его повышения, выполненные в том числе отдельно по странам мира. Привлекают внимание также исследования, проведенные под эгидой Международного союза электросвязи, Европейской комиссии, Всемирного банка, ЮНЕСКО и прочих; эти вопросы получили свое развитие в работах T. Hüsing, A. Schleicher, V. Spiezia, A. Spitz-Oener и пр.

<sup>1</sup> Gartner: Top 10 Strategic Technology Trends for 2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.gartner.com/en/articles/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2023>. Date of access: 09.01.2023.

Анализ результатов, полученных в проведенных исследованиях, позволяет выделить две основные тенденции, характеризующие современный рынок труда [1–3]. С одной стороны, четко прослеживается тренд замещения человека машиной. Статистика подтверждает тот факт, что доля труда в национальном доходе многих развивающихся стран (прежде всего связанного с выполнением рутинных операций) существенно снизилась. Этот тренд не утрачивает своей актуальности – по данным Всемирного экономического форума, компании намерены активизировать работу в сфере цифровой трансформации своих бизнес-процессов, их автоматизации, уменьшить затраты на оплату труда сотрудников, в том числе расширить практику аутсорсинга персонала для решения специализированных задач. Таким образом, существенно увеличивается риск безработицы для людей с низким уровнем квалификации и с недостаточным уровнем цифровой грамотности.

Вторая тенденция – нехватка кадров необходимой квалификации, т. е. персонала с высоким уровнем цифровой грамотности. По данным Statista<sup>2</sup>, уже сегодня компании сталкиваются с дефицитом программистов-разработчиков, специалистов в сфере информационной безопасности, аналитики больших данных, облачных технологий, искусственного интеллекта, проектных менеджеров, UX/UI-дизайнеров и пр. Все это требует, с одной стороны, подготовки специалистов в сфере ИКТ, обучения цифровой грамотности в учреждениях образования (школах, колледжах, вузах), а с другой – создания эффективной системы переподготовки и повышения квалификации взрослых.

Следует отметить, что при кажущейся многоаспектности и обширности исследований еще многие вопросы и механизмы требуют дополнительного рассмотрения. В рассматриваемой проблематике недостаточно внимания получили аспекты, связанные с экономической оценкой инвестиций в цифровую грамотность, причем как на уровне государства, так и на уровне организаций. Обычно инвестиции в личностный потенциал индивида, в структуру которого входит и его цифровая грамотность, рассматриваются главным образом со стороны необходимости изыскания дополнительных денежных средств, а в качестве результата (эффекта) приводятся общие формулировки о повышении интеллектуального потенциала организации, росте ее престижа как работодателя, повышении мотивации персонала и пр. Несомненно, дефиниция полученного эффекта с такой точки зрения имеет право на существование. В то же время она рассматривается слишком широко, что затрудняет более детальное вычленение тех эффектов, которые могут быть получены в результате повышения цифровой грамотности людей, что, в свою очередь, делает невозможным рассчитать эффективность предлагаемых мероприятий с экономической точки зрения. Несомненная важность такой задачи заключается в том, что руководство организаций должно иметь четкое видение и представление о том, какие эффекты на самом деле могут быть получены в результате внедрения различного комплекса мероприятий, направленных на повышение цифровой грамотности персонала.

Таким образом, целью исследования является разработка методических подходов к оценке экономической эффективности повышения цифровой грамотности персонала организаций. В исследование намеренно не включены вопросы оценки эффективности повышения цифровой грамотности населения на уровне государства, поскольку такого рода задача представляет собой отдельный научный поиск, который тем не менее можно провести, основываясь на полученных в ходе данного исследования результатах.

### **Цифровая грамотность: подходы к определению понятия**

Для сохранения конкурентных позиций на рынке труда в цифровой экономике индивиду необходимы разнообразные навыки, которые условно можно разделить на три группы: когнитивные, социальные и поведенческие, технические [4, 5]. Когнитивные навыки включают способность понимать, анализировать и передавать большие объемы информации, а также способность применять эту информацию в повседневных ситуациях. Социальные и поведенческие – навыки, которые необходимы для работы с другими людьми, для достижения личных целей и управления эмоциями. Навыки, необходимые для выполнения работы (иногда их называют техническими), также востребованы в современном мире. Они включают в себя целый спектр навыков, к которым обычно относят навыки ручного труда, умение работать с материалами, механизмами и инструментами; технические навыки, приобретенные в процессе обучения или профессиональной подготовки по окончании средней школы, либо в процессе трудовой деятельности; навыки, не-

<sup>2</sup> In What Area are You Suffering a Skills Shortage? [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.statista.com/statistics/662423/worldwide-cio-survey-function-skill-shortages/>. Date of access: 09.01.2023.

обходимые для работы по конкретной профессии, например, инженера, экономиста или специалиста по информационным технологиям. В отличие от когнитивных или социальных навыков, они связаны с выполнением конкретных профессиональных обязанностей. Эти навыки обычно закрепляются в должностных инструкциях [6–9].

Рассматривая функциональную структуру вышеуказанных групп, специалисты делают акцент на так называемых цифровых навыках, понимая под ними те, которые необходимы для полноценного включения как в рынок труда в условиях его цифровизации, так и в систему общественной, социальной, политической жизни общества, также претерпевающей изменения. Национальный центр исследований в области профессионального образования Австралии определяет цифровые навыки как сочетание цифрового мышления (умение пользоваться аппаратным и программным обеспечением, информационными системами), знаний (теоретических и практических), компетентности (применение знаний на практике) и личностных установок (ценности и убеждения человека).

Представляется более целесообразным использовать термин «цифровая грамотность». В [10, 11] проанализированы подходы к определению данного понятия и предложена его авторская трактовка, в соответствии с которой цифровая грамотность рассматривается как совокупность знаний, навыков и установок поведения индивида в сфере информационно-коммуникационных технологий, а также способность применять их на практике в повседневной и профессиональной деятельности с учетом изменений технических и социально-экономических условий. К числу таких знаний и навыков относятся, например, работа с аппаратным и программным обеспечением; сбор, хранение, анализ и передача информации в текстовом виде, в виде изображений, аудио- и видеоматериала; участие и социальное взаимодействие в информационном обществе (использование социальных сетей, взаимодействие в сферах электронного правительства, электронного здравоохранения, электронных финансов, электронного бизнеса); знания и навыки в сфере информационной безопасности.

Коммерческие организации осознают необходимость повышения уровня цифровой грамотности своих сотрудников, поэтому развивают корпоративную культуру, поощряют интерес и открытость персонала к новым цифровым инструментам. Повышение уровня цифровой грамотности также означает, что сотрудникам нужны дополнительные ресурсы – время, финансы, места. А это, в свою очередь, приводит к необходимости обучения, переподготовки и повышения квалификации имеющегося персонала, а также ставит вопрос оценки эффективности такого рода программ.

### **Оценка эффективности повышения уровня цифровой грамотности в организациях**

Предлагаемый в статье алгоритм оценки эффективности мероприятий по повышению уровня цифровой грамотности сотрудников организации основывается на традиционном подходе сравнения затрат с полученным результатом. На рис. 1 приведена структура затрат на повышение цифровой грамотности сотрудников. Алгоритм оценки экономической эффективности инвестиций организации в повышение цифровой грамотности ее сотрудников изображен на рис. 2. Рассмотрим подробнее этапы применения алгоритма на рис. 2.

1. На данном этапе, во-первых, устанавливается несоответствие между необходимым и реальным уровнями цифровой грамотности сотрудников, во-вторых, задается целевой уровень цифровой грамотности сотрудников к определенному моменту времени в будущем (например, к окончанию программы повышения цифровой грамотности, курсов, семинаров и пр.).

2, 3. Изучаются альтернативные способы повышения цифровой грамотности сотрудников – рассматриваются и сравниваются такие возможные варианты, как оплата курсов, тренингов, приглашение специалистов непосредственно в компанию для проведения обучения и т. п. На этих этапах следует учесть не только затраты на вышеуказанные мероприятия, но и такие факторы, как удобство и комфорт организации и проведения занятий для сотрудников.

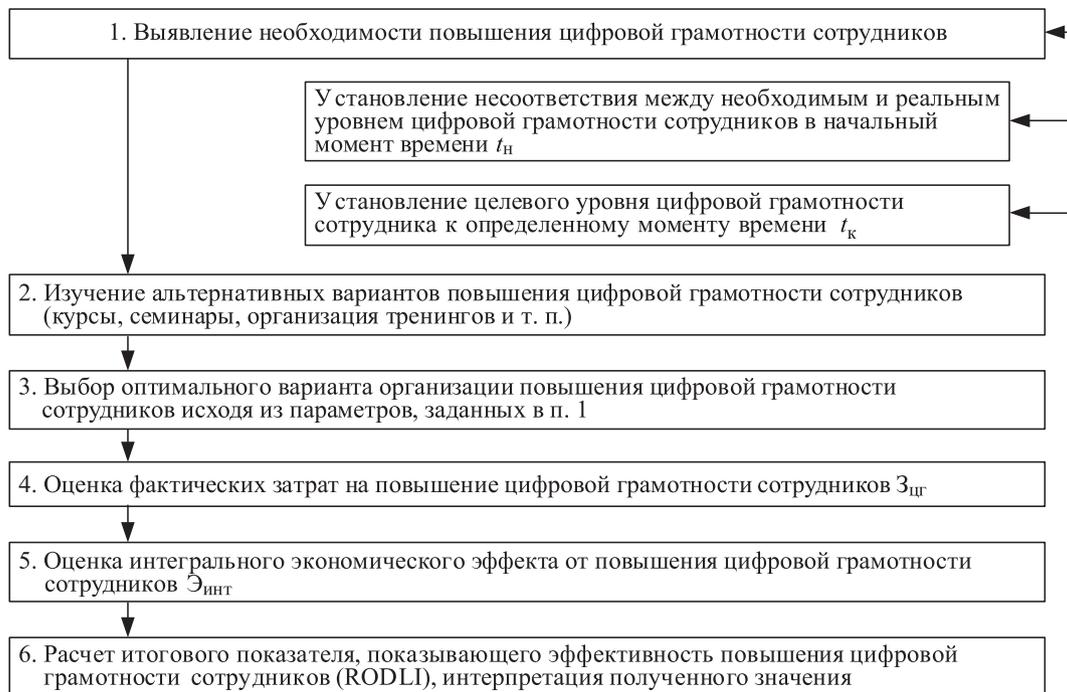
4. Предполагает более точный (по сравнению с плановым) расчет необходимой суммы для реализации запланированных мероприятий.

5. При оценке эффективности реализации запланированных мероприятий принято различать следующие виды эффектов: экономический, научно-технический, социальный, экологический [12–14].



**Рис. 1.** Структура затрат на повышение цифровой грамотности сотрудников (собственная разработка автора)

**Fig. 1.** The cost structure for improving the digital literacy of employees (the author's own development)



**Рис. 2.** Алгоритм оценки экономической эффективности инвестиций в повышение цифровой грамотности сотрудников организации (собственная разработка автора)

**Fig. 2.** Algorithm for evaluating the economic efficiency of investments in increasing the digital literacy of employees of the organization (the author's own development)

• *Экономический эффект*, как правило, рассматривается с точки зрения повышения эффективности финансовой деятельности субъекта хозяйствования, рационального использования ресурсов, увеличения добавленной стоимости, динамики прибыли. Экономический эффект, полученный в результате повышения цифровой грамотности, будет выражен, прежде всего, в повышении производительности труда, снижении производственных затрат, производстве продукции с улучшенными технико-экономическими характеристиками.

• Повышение цифровой грамотности, несомненно, будет содействовать появлению и распространению в обществе новых технологий, открытий, изобретений в сфере ИКТ. В этом и заключается сущность *научно-технического эффекта*, который также выражается в приращении новых знаний, в создании условий для разработки и внедрения перспективных технологий, в их масштабировании, способствует формированию интеллектуальной и материальной базы цифровой трансформации, распространению процессов цифровизации в обществе и экономике.

• *Экологический эффект*, главным образом, заключается в поддержке процессов цифровой трансформации, которые, в свою очередь, способствуют снижению негативного экологического воздействия на окружающую среду (в частности, в результате сокращения натуральных объемов выбросов загрязняющих веществ, включая парниковые газы). По мнению экспертов, цифровизация секторов экономики приводит к уменьшению аварийных выбросов и потерь при транспортировке ресурсов, сокращению удельного потребления углеродсодержащих топливно-энергетических ресурсов, развитию модели устойчивого и экологичного потребления.

• *Социальный эффект*, главным образом, будет заключаться в смягчении негативных тенденций на рынке труда, связанных с цифровой трансформацией, а также происходящих структурных сдвигов в экономике, способствуя сохранению уровня занятости, снижению уровня безработицы, тем самым предотвращая расслоение общества и вызванные им возможные социальные конфликты. Социальный эффект также проявляется в повышении качества жизни людей, что подразумевает появление новых нематериальных ценностей (культурных, этических, эстетических), улучшение жилищных и культурно-бытовых условий, здоровья и условий труда, снижение производственного травматизма и рисков для здоровья и жизни персонала в результате оптимизации условий производства, создание условий для самореализации, развития человеческого потенциала, освоения новых знаний и компетенций.

В табл. 1 приведен пример расчета перечисленных эффектов.

**Таблица 1.** Пример расчета эффектов повышения цифровой грамотности сотрудников  
**Table 1.** Example of calculating the effects of increasing the digital literacy of employees

Вид эффекта, его составляющие/ Type of effect, its components	Условное обозначение/Symbol	Формула расчета/ Calculation formula
Экономический эффект, выражающийся в:		
увеличении выработки	$\Delta B$	$\sum \Delta B_{\text{час}i} D_i \cdot P_i$
снижении производственных затрат	$\Delta Z$	$\sum V_{\text{общ}} \Delta b_i + \Delta a_i$
производстве и реализации продукции с улучшенными технико-экономическими характеристиками	$\Delta УХк$	$РП_1(\Delta Ц - \Delta C_{T3})$
Совокупный эффект	$\mathcal{E}_{\text{экон}}$	$\Delta B \cdot Ц_{i0} + \Delta Z + \Delta УХк$
Научно-технический эффект, выражающийся в:		
создании условий для разработки и внедрения перспективных технологий, а также их масштабирования	$\Delta НТ$	$\sum V_{\text{общ}} \Delta C_{\text{нт}}$
изменении ассортимента и структуры продукции	$\Delta АС$	$\frac{\sum (У_{D_1} - У_{D_{i0}}) Ц_{i0}}{100} V_{\text{общ}}$
Совокупный эффект	$\mathcal{E}_{\text{науч-техн}}$	$\Delta НТ + \Delta АС$
Экологический эффект, выражающийся в:		
снижении аварийных выбросов и потерь при транспортировке ресурсов	$\Delta A_{\text{трансп}}$	$(УП_0 - УП_1) V_1$

Окончание табл. 1  
Ending of Tabl. 1

Вид эффекта, его составляющие/ Type of effect, its components	Условное обозначение/Symbol	Формула расчета/ Calculation formula
уменьшении удельного потребления углеродсодержащих топливно-энергетических ресурсов	$\Delta \text{УдПотр}$	$\sum \Delta \text{УдП}_{\text{тэ}i} \cdot V_1 \cdot \text{Ц}_{i0}$
Совокупный эффект	$\mathcal{E}_{\text{экол}}$	$\Delta A_{\text{трансп}} + \Delta \text{УдПотр}$
Социальный эффект, выражающийся в:		
улучшении здоровья, условий труда	$\Delta \text{ЗдУтр}$	$-(\sum \Delta \text{Дбл}_i \cdot \text{УВ}_i)$
снижении производственного травматизма, рисков для здоровья и жизни персонала в результате улучшений условий производства	$\Delta \text{ПрТр}$	$(\text{ЧДр}_0 - \text{ЧДр}_1) \cdot \sum (\text{Д}_i \text{П}_i \cdot \Delta \text{В}_{\text{час}})$
Совокупный эффект	$\mathcal{E}_{\text{соц}}$	$\Delta \text{ЗдУтр} + \Delta \text{ПрТр} \cdot \text{Ц}_{i0}$

*Условные обозначения*

$\Delta \text{В}_{\text{час}}$  – изменение среднечасовой выработки  $i$ -го сотрудника, ед.;  
 $\text{Д}_i$  – количество отработанных дней одним сотрудником за год, дней;  
 $\text{П}_i$  – средняя продолжительность рабочего дня, ч;  
 $V_{\text{общ}}$  – объем производимой продукции (работ, услуг), ед.;  
 $\Delta b_i$  – изменение уровня переменных затрат на единицу продукции в результате повышения цифровой грамотности сотрудников, руб.;  
 $\Delta a_i$  – изменение уровня постоянных затрат на весь выпуск продукции в результате повышения цифровой грамотности сотрудников, руб.;  
 $\Delta \text{Ц}$  – изменение цены производимой продукции (работ, услуг) в результате улучшения ее технико-экономических характеристик, руб.;  
 $\Delta C_{\text{тэ}}$  – изменение себестоимости производимой продукции (работ, услуг) в результате улучшения ее технико-экономических характеристик, руб.;  
 $\text{РП}_1$  – объем реализации продукции с улучшенными технико-экономическими характеристиками, ед.;  
 $\Delta C_{\text{инт}}$  – изменение себестоимости  $i$ -го вида производимой продукции (работ, услуг) в результате внедрения новых технологий, руб.;  
 $\text{Уд}_{i0}, \text{Уд}_{i1}$  – доля  $i$ -го вида производимой продукции (работ, услуг) до и после изменения ассортимента и структуры продукции, %;  
 $\text{Ц}_{i0}$  – цена  $i$ -го вида производимой продукции (работ, услуг), руб.;  
 $\text{УП}_0, \text{УП}_1$  – величина потерь при транспортировке ресурсов в расчете на единицу продукции до и после повышения цифровой грамотности сотрудников, руб.;  
 $V_1$  – объем производимой продукции (работ, услуг) после внедрения мероприятий по повышению цифровой грамотности сотрудников, ед.;  
 $\Delta \text{УдП}_{\text{тэ}i}$  – изменение удельного потребления  $i$ -го вида углеродсодержащих топливно-энергетических ресурсов в результате внедрения мероприятий по повышению цифровой грамотности сотрудников, ед.;  
 $\text{Дбл}_i$  – изменение числа дней, в которые  $i$ -й сотрудник не вышел на работу из-за болезни, в результате улучшения его здоровья вследствие внедрения более прогрессивных технологий и условий труда;  
 $\text{УВ}_i$  – упущенная выгода, т. е. потери, возникшие в результате болезни  $i$ -го сотрудника из-за невыхода его на работу, руб.;  
 $\text{ЧДр}_0, \text{ЧДр}_1$  – число сотрудников, занятых на рабочих местах с вредными условиями труда до и после изменения технологий, ставшее возможным в результате внедрения мероприятий по повышению цифровой грамотности сотрудников, чел.

Таким образом, интегральный экономический эффект в результате повышения цифровой грамотности сотрудников может быть рассчитан следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \mathcal{E}_{\text{экон}} + \mathcal{E}_{\text{науч-техн}} + \mathcal{E}_{\text{экол}} + \mathcal{E}_{\text{соц}} \quad (1)$$

6. Расчет окупаемости инвестиций в цифровую грамотность RODLI (return on digital literacy investment) выполняется по формуле

$$\text{RODLI} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инт}} - \mathcal{Z}_{\text{цг}}}{\mathcal{Z}_{\text{цг}}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Если целевое значение RODLI более 100 %, – это означает, что мероприятия по повышению цифровой грамотности сотрудников были эффективны. В случае, если RODLI = 100 %, то эффект, полученный в результате внедрения мероприятий по повышению цифровой грамотности, равен понесенным затратам. При RODLI < 100 % реализованные мероприятия неэффективны.

Следует также выделить *мультипликативный эффект* от повышения цифровой грамотности персонала. Его воздействие можно разложить на три основные составляющие:

1) непосредственные эффекты, связанные с ускорением процессов цифровой трансформации;

- 2) дополнительные эффекты за счет межотраслевых связей;
- 3) эффекты от распределения доходов.

Механизм разворачивания мультипликативного эффекта в данном случае аналогичен производственному мультипликатору и в общем виде выглядит следующим образом [15]. При повышении цифровой грамотности ускоряются процессы цифровой трансформации, причем это ускорение носит дуальный характер. Так, индивид, повышая свою цифровую грамотность, с одной стороны, способствует цифровизации организации, в которой он работает, создавая спрос на информационные продукты в секторе B2B. С другой стороны, «уходя» домой с работы, он также создает спрос на информационные продукты уже в секторах B2C и G2C, тем самым придавая дополнительный импульс цифровизации смежных отраслей, распространяясь по всей социально-экономической системе. Дальнейшая амплификация цифровых преобразований сопровождается соответствующим ростом доходов (налогов, зарплат, прибыли), которые перераспределяются и трансформируются в рост конечного спроса государства, бизнеса и населения.

### Заключение

1. Процессы цифровизации трансформируют рынок труда. Для многих компаний происходящие изменения носят революционный характер. Спрос на сотрудников, которые могут эффективно выполнять свои профессиональные задачи в современных условиях, выстраивать и осуществлять взаимодействие при помощи различных цифровых технологий, а также способны плодотворно их использовать, больше, чем когда-либо ранее. При этом существует высокий риск безработицы для тех людей, которые выполняют операции, легко поддающиеся автоматизации.

2. Для фирм сотрудники, обладающие высоким уровнем цифровой грамотности, являются необходимым условием конкурентного успеха в условиях цифровизации бизнес-процессов. Компании нуждаются в специалистах, которые компетентны в вопросах анализа данных, кибербезопасности, облачных технологий и т. п. Один из способов устранения кадрового дефицита – повышение цифровой грамотности уже нанятого персонала.

3. В качестве цели исследования рассматривалась разработка методических подходов к оценке экономической эффективности повышения цифровой грамотности персонала организаций. Для достижения данной цели в статье предложен алгоритм оценки эффективности такого рода мероприятий, позволяющий провести как комплексный анализ затрат на повышение цифровой грамотности сотрудников, так и всесторонне оценить полученные результаты. Алгоритм дает возможность рассчитать величину экономического, научно-технического, экологического и социального эффекта, а также итоговый показатель, показывающий эффективность повышения цифровой грамотности сотрудников. Приведена интерпретация полученных значений, дающая руководству однозначную экономическую оценку проведенных мероприятий.

### Список литературы

1. Беляцкая, Т. Н. Управление электронной экономикой / Т. Н. Беляцкая // Наука и инновации. 2018. № 5. С. 49–55.
2. Galor, O. Ability Biased Technological Transition, Wage Inequality Within and Across Groups, and Economic Growth / O. Galor, O. Moav // The Quart. J. of Economics. 2000. Vol. 115, No 2. P. 469–497.
3. Krueger, A. B. How Computers Have Changed the Wage Structure: Evidence from Microdata, 1984–1989 / A. B. Krueger // The Quart. J. of Economics. 1993. Vol. 108, No 1. P. 33–60.
4. Autor, D. H. The Skill Content of Recent Technological Change: an Empirical Exploration / D. H. Autor, F. Levy, R. Murnane // The Quart. J. of Economics. 2003. Vol. 118, No 4. P. 1279–1333.
5. Card, D. Skill-biased Technological Change and Rising Wage Inequality: Some Problems and Puzzles / D. Card, J. E. DiNardo // J. of Labor Economics. 2002. Vol. 20, No 4. P. 733–783.
6. Haskel, J. Computers and the Demand for Skilled Labour: Industry- and Establishment-Level Panel Evidence for the UK / J. Haskel, Y. Heden // The Econ. J. 1999. Vol. 109, No 454. P. C68–C79.
7. Koltay, T. Research 2.0 and the Future of Information Literacy / T. Koltay, S. Špiranec, L. Karvalics. Cambridge: Chandos Publishing, 2016. 190 p.
8. Reaping Digital Dividends: Leveraging the Internet for Development in Europe and Central Asia / T. Kelly [et al.]. Washington: World Bank, 2017. 229 p.
9. Spitz-Oener, A. Technical Change, Job Tasks, and Rising Educational Demands: Looking Outside the Wage Structure / A. Spitz-Oener // J. of Labor Economics. 2006. Vol. 24, No 2. P. 235–270.

10. Князькова, В. С. Оценка уровня знаний и навыков населения Республики Беларусь в сфере информационной безопасности в условиях перехода к электронной экономике / В. С. Князькова // Цифровая трансформация. 2018. № 3. С. 34–45.
11. Князькова, В. С. Теоретико-методологический подход к дефиниции понятия «цифровая грамотность» / В. С. Князькова // Новая экономика. 2019. Т. 74, № 2. С. 92–97.
12. Бучаева, С. А. Виды экономических эффектов и особенности их оценки для инноваций / С. А. Бучаева, М. М. Гаджиев // *π-Economy*. 2012. Т. 151, № 4. С. 225–229.
13. Лесников, И. Н. Модель оценки эффективности инвестиций в персонал предприятия / И. Н. Лесников // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2009. Т. 37, № 1. С. 114–122.
14. Лукичева, Л. И. Оценка эффективности инвестирования в развитие персонала / Л. И. Лукичева, С. В. Голованов // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2014. Т. 2, № 2. С. 29–37.
15. Широв, А. А. Оценка мультипликативных эффектов в экономике. Возможности и ограничения / А. А. Широв, А. А. Янтовский // ЭКО. 2011. Т. 440, № 2. С. 40–58.

## References

1. Beliatkaya T. N. (2018) E-Economy Management. *Science and Innovations*. (5), 49–55 (in Russian).
2. Galor O., Moav O. (2000) Ability Biased Technological Transition, Wage Inequality Within and Across Groups, and Economic Growth. *The Quart. J. of Economics*. 115 (2), 469–497.
3. Krueger A. B. (1993) How Computers Have Changed the Wage Structure: Evidence from Microdata, 1984–1989. *The Quart. J. of Economics*. 108 (1), 33–60.
4. Autor D. H., Levy F., Murnane R. (2003) The Skill Content of Recent Technological Change: an Empirical Exploration. *The Quart. J. of Economics*. 118 (4), 1279–1333.
5. Card D., DiNardo E. (2002) Skill-biased Technological Change and Rising Wage Inequality: Some Problems and Puzzles. *J. of Labor Economics*. 20 (4), 733–783.
6. Haskel J., Heden Y. (1999) Computers and the Demand for Skilled Labour: Industry- and Establishment-Level Panel Evidence for the UK. *The Econ. J.* 109 (454), C68–C79.
7. Koltay T., Špiranec S., Karvalics L. (2016) *Research 2.0 and the Future of Information Literacy*. Cambridge, Chandos Publishing. 190.
8. Kelly T. [et al.] (2017) *Reaping Digital Dividends: Leveraging the Internet for Development in Europe and Central Asia*. Washington, World Bank. 229.
9. Spitz-Oener A. (2006) Technical Change, Job Tasks, and Rising Educational Demands: Looking Outside the Wage Structure. *J. of Labor Economics*. 24 (2), 235–270.
10. Knyazkova V. S. (2018) Assessment the Level of Knowledge and Skills of the Population of the Republic of Belarus in the Field of Information Security in the Context of the Transition to E-Economy. *Digital Transformation*. (3), 34–45 (in Russian).
11. Knyazkova V. S. (2019) Theoretical and Methodological Approach to the Definition of the Concept of “Digital Literacy”. *New Economy*. 74 (2), 92–97 (in Russian).
12. Buchaeva S. A., Gadzhiev M. M. (2012) Types of Economic Effects and Features of their Assessment for Innovation. *π-Economy*. 151, (4), 225–229 (in Russian).
13. Lesnikov I. N. (2009) Model for Evaluating the Effectiveness of Investments in the Personnel of the Enterprise. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 37 (1), 114–122 (in Russian).
14. Lukicheva L. I., Golovanov S. C. (2014) Evaluation of the Effectiveness of Investment in Personnel Development. *Economic and Socio-Humanitarian Researches*. 2 (2), 29–37 (in Russian).
15. Shirov A. A., Yantovskii A. A. (2011) Assessment of Multiplier Effects in the Economy. Opportunities and Limitations. *ECO*. 440 (2), 40–58 (in Russian).

## Сведения об авторе

**Князькова В. С.**, к. э. н., доцент кафедры менеджмента Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-86-46  
E-mail: knyazkova@bsuir.by  
Князькова Вероника Святославовна

## Information about the author

**Knyazkova V. S.**, Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Management of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-86-46  
E-mail: knyazkova@bsuir.by  
Knyazkova Veronika Sviatoslavovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-32-35>

*Original paper*

UDC 004

## CONCEPTUAL FRAMEWORK AND ANALYSIS OF THE BUSINESS INCUBATION PROCESS

NADEZHDA G. GALIYEVA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 24.11.2022*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

**Abstract.** The main stages of the study and analysis of the business incubation process (in the relevant organizations) are presented, both from the perspective of a resident and from the side of a business incubator. The accepted approach to the specifics and characteristics of the leading business incubators / accelerators and other similar organizations from the point of view of project management is explained. In the process of research, a review of academic works and sources of professional associations / institutional organizations was carried out, in which the existing definitions of a business incubator are analyzed, an overview of the organization / business model (business incubator) is provided together with data collection (from interviews and questionnaires). The most famous business incubation programs have been studied. A functional model of a business incubator has been obtained, as well as a set of key performance indicators (KPIs) and metrics that can be useful for a business incubator to achieve effective company management.

**Keywords:** business incubator, business model, information management system, key performance indicator (KPI), metric, resident, earned value management (EVM).

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**Gratitude.** The author expresses his deep gratitude to the foreign consultant Prof. D. L. Fusci (PhD, Coventry University, UK), supervisor PhD B. V. Nikulshin (BSUIR, Belarus), PhD D. V. Likhachevsky (BSUIR, Belarus).

**For citation.** Galiyeva N. G. (2023) Conceptual Framework and Analysis of the Business Incubation Process. *Digital Transformation*. 29 (1), 32–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-32-35>.

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ ОСНОВА И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА БИЗНЕС-ИНКУБИРОВАНИЯ

Н. Г. ГАЛИЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 24.11.2022*

**Аннотация.** Приведены основные этапы исследования и анализ процесса бизнес-инкубирования (в соответствующих организациях) как с позиции резидента, так и со стороны бизнес-инкубатора. Объясняется принятый подход к специфике и характеристикам ведущих бизнес-инкубаторов/акселераторов и других подобных организаций с точки зрения управления проектами. В процессе исследований выполнен обзор академических трудов и источников профессиональных ассоциаций/институциональных организаций, в которых анализируются существующие определения бизнес-инкубатора, приводится обзор организации/бизнес-модели (бизнес-инкубатора) совместно со сбором данных (из интервью и анкетирования). Изучена наиболее известная программа бизнес-инкубирования. Получены функциональная модель бизнес-инкубатора, а также набор ключевых показателей эффективности (КПИ) и метрик, которые могут быть полезны бизнес-инкубатору для достижения эффективного управления компанией.

**Ключевые слова:** бизнес-инкубатор, бизнес-модель, информационно-управляющая система, ключевой показатель эффективности (КПИ), метрика, резидент, управление освоением объемом (EVM).

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Автор выражает глубокую благодарность зарубежному консультанту проф. Д. Л. Фуски (PhD, Coventry University, Великобритания), научному руководителю к. т. н. Б. В. Никульшину (БГУИР, Беларусь), к. т. н. Д. В. Лихачевскому (БГУИР, Беларусь).

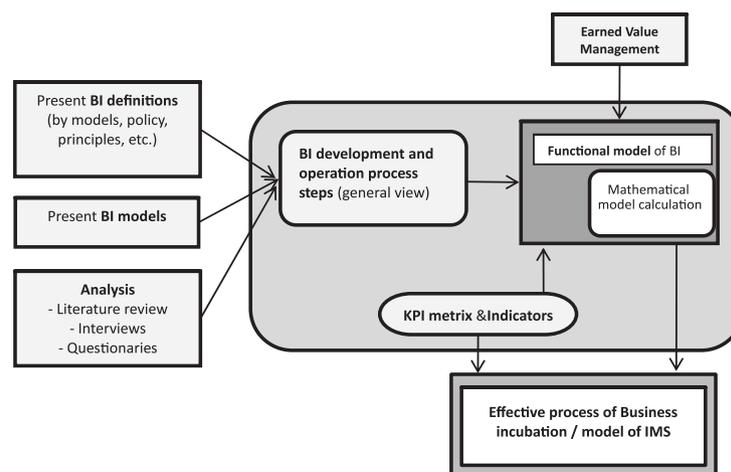
**Для цитирования.** Галиева, Н. Г. Концептуальная основа и анализ процесса бизнес-инкубирования / Н. Г. Галиева // Доклады БГУИР. 2023. Т. 29, № 1. С. 32–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-32-35>.

## Introduction

It is widely acknowledged that business incubation is a specific approach for growing a country's economic status. This research has been triggered by the realization that the main problem emerging from a critical analysis of the business incubation literature is the narrow focus on the econometrics and more specifically the performance of the fund acquisition by residents. This fact along with the observation that a large number of start-ups fail (up to 90 %) advocates for a critical analysis of business incubator (BI) processes, their activities and work efficiency and effectiveness. It is well known that all organizations want to be successful in their environment. This is certainly also the case with BI, especially as the expectations are that business incubators deliver successful startups that will contribute to the economic growth of the country. In literature it was apparent that almost every conducted study is interested in understanding the financial performances of the residents' startups once they leave the incubator and the return on investment (ROI) they generate for the investors and shareholders once graduated. Most studies focus on economic side but very few on the social side and social benefit for (community) environment. The social ROI (SROI) is barely addressed if at all and the sustainability of business incubation is substantially not addressed. Therefore, the conducted research has been trying to understand which aspects are important and how to measure the efficiency and effectiveness of business incubator work from engineering and project management approaches. The usage of earned value management (EVM) allows to reconcile the engineering/project management approaches with the financial one as EVM uses financial values as the basis for the efficiency computation.

## Research design

A graphical description of the research structure in terms of sources and outputs is presented in Fig. 1. This can be compared to a conceptual framework. It allows to describe the main steps performed, the sources used, and the output delivered. The diagram should be read from left to right. The blocks inside the curved edged rectangle represent the key components of the research work.



**Fig. 1.** Conceptual framework of performed research: analysis of the business incubation process (*author's own development*)

Operationally, the first steps have been:

- analysis of literature review, interviews, questionnaires;
- identification and analysis of currently available BI definitions and incubator models.

The literature review analysis includes an extensive review of the literature from both academic and professional association/institutional sources, such as InBIA (International Business Innovation Association),

EY (Ernst & Young Global Limited), Nesta, InfoDev, EBN Innovation, etc. Two autumns (2017–2018) were spent focusing on this aspect of the study, the number of visited organizations (business incubators, accelerators, technology parks) accounts to 10 pcs. [1]. During the interview with the administration of each organizations [1], an agreement was reached to send 3 types of questionnaires aimed at collecting data both for the organization itself (business incubators, accelerators, technology parks) and for resident companies (from March to June 2018). The questionnaires were sent to more than 20 BI, accelerators, and technology parks – 20 % of them answered.

From a point of view of clarity is necessary to point out that there are too many different definitions of BI (of the identified 185 definitions found in this study, 53 definitions of “business incubator” [1] were reported having significant differences) that it was necessary to choose one of that could be general enough to accommodate all aspects encountered in the various definition and therefore clearly present the core idea of BI [2, 3]. A similar difficulty was encountered in terms of functioning model descriptions; therefore, it was needed to identify which of the available models could be the best starting point for the research. It was considered that [1, 4] were the most suitable.

As a result of the analysis made during the first steps of this study, the stages of the BI development and operation process (presented in a general form [4]) were identified to reflect the significant aspects that occur in a BI from the initial point of establishing a business incubator as an organization and until the completion of the incubation program taking into account all possible options and risks associated with the program. A schematic representation of the process has been provided for both the BI and the resident.

Based on the previous description, a functional model of the process aimed at managing a BI was further proposed including program execution based on the general process discussed [4]. The proposed functional model, along with its mathematical description, incorporates selected key performance indicators (KPI) and an agreed engineering and design approach exploiting the EVM performance monitoring and management approaches [5]. As mentioned above, the boxes contained in the curved rectangle are the essence of this study, which, when used in BI activities, should lead to a more efficient management of the business incubation process in terms of design and project management.

## Results and discussions

The results of the research can be summarized in the functional model, the set of metrics, the set of indicators, the set of KPI. The functional model describes and connects the incubation program of the BI with the development of the resident. The model allows to estimate the process output, that in turn allows to monitor the progress of the residents. In this respect a collection of scientific literature, professional association reports and guidelines from institutions such as the World Bank, United Nation, CSI, and the EU commission on how to setup BI was built. By combining all gathered information it's been possible to cover a gap identified in the literature, as so the scientific literature has focused primarily on the financial aspect of the resident performance (that is: how that money they are collected, how fast they are developing, how much they contribute to the market and the economy), but doesn't cover the process performance aspects in terms of how much money was needed by the BI, how many companies failed, how many companies were not accepted. If lacking this information, it doesn't allow ascertain the efficiency of the process and therefore the actual economic impact. Comparing the report from the Nesta, United Nation, EU commission, etc., with literature apparent that reports focus on what the resident managed to do but rarely on how to achieve this. From an engineering perspective, when examining the result of the project, it is necessary not only to look at its output, but also, and in particular, to how well the resources available have been used. Since BI is perceived as (and possibly aimed to) support to the economy, if it is not efficient and effective, then what's the benefit?

As it was said [1] is it that S. M. Hackett and D. M. Dilts [6] say that the result of business incubation can be described by a formula where they talk about BI munificence (or in other terms how generous the BI is). This approach raises questions, does it mean that BI do a kind of charity work? UN general Secretary Boutros-Ghali once quoted in his speech the adage: “If you give a man fish, you feed him for a day. If you teach a man to fish, you feed him for a lifetime”. This can also be adapted to business incubation as if BI just gives money and only a few of those residents are successful then there is no real benefit and the result is not as desired. This approach clashes with the engineering one where every time a system is revised, the aim is to achieve more efficiency.

The intent of the conducted research has been therefore to make sure the BI process works as efficiently as possible. Professional association such as InBIA, and research centers such as Nesta or the European Commission and CSI explain that BI provide: space, training, equipment, services [e. g. ad-

vice on what to do], researchers such as R. Cabral [7] provide principles to take into account, but no one focuses on how to measure if what is given leads to the expected result.

Another important aspect of this study is the attention to information system (IS). Its implementation and presence in the BI as an integral part of the organization and the project. In an age of highly advanced technology, when businesses need to act quickly and there is so much to learn and to do. Information systems are a way to make sure the right decision or the right choice are made. It was not possible to find in BI-related literature any attention to this aspect, and therefore, looking at what large companies are doing, the research suggests an approach to the design of a customized IS specifically designed for supporting BI. In the proposed concept the system is structured so as to provide the BI with their own IS & ERP as well as to offer a virtualized access to individualized IS & ERP to residents. This approach has a twofold benefit: it provides the residents with the best of the IT/ICT technology currently available to support a company management and decision-making processes, and it also offers a way to support BI finances as the service can be further provided (at a cost) after residents have completed their studies. Because residents will have used the system, they know it, they are used to it, so they are likely to keep using it. If they want to keep using it, they will have to pay (if they do not want to keep it, they will have likely to get another one, thus keeping the one they are used to is likely to be a preferred choice). It is acknowledged that this approach will have a cost to be set up by a BI and the more the BI operates, the more the system may cost, at the same time, this will represent a business (like Google started by providing search services and is now providing solution and even IT/ICT incubation).

### Conclusion

Business incubators are potentially one of the breakthrough factors influencing the growth of the country's economy. The innovative and inventive ideas that are “nurtured” (cultivated) within the framework of the business incubation program, and later, having left the walls of the business incubator and become independent companies, are likely to effectively drive innovation and generate new and significant sources of a solid growth of the country's GDP. Overall, there is a sufficient number of business incubators, accelerators, technology parks and other similar organizations in every country around the world, but to this date it is still unclear how to evaluate their activities and processes in terms of efficient and effective use of the invested resources when compared to the provided output. This article described the key points of a scientific study dedicated to the evaluation of the effectiveness of business incubators.

### References

1. Galiyeva N., Fuschi D. L. (2021) A Review of Business Incubator Model Related Literature and Evolution. *Journal of Organisational Studies and Innovation*. 8 (4). 1–12.
2. Galiyeva N., Fuschi D. L. (2018) A Research Proposal for Measuring the Effectiveness of Business Incubators. *Journal of Organisational Studies and Innovation*. 5 (3), 32–46.
3. Galiyeva N., Fuschi D. L. (2019) Business Incubator, an Ever Changing Process, and its Definitions. *Journal of Organisational Studies and Innovation*. 6 (3), 25–36.
4. Fuschi D. L., Galiyeva N. (2022) A Process Based Model of Business Incubator in Systems Engineering Terms. *Journal of Organisational Studies and Innovation*. 9 (1), 62–103.
5. Fuschi D. L., Galiyeva N. (2022) Proposal for a Set of Business Incubator Performance Metrics Based System and Model Analysis. *Journal of Organisational Studies and Innovation*. 9 (2), 38–60.
6. Hackett S. M., Dilts D. M. (2004). A Real Options-Driven Theory of Business Incubation. *The Journal of Technology Transfer*. 29 (1), 41–54.
7. Cabral R., Dahab S. (1998) Science Parks in Developing Countries: the Case of BIORIO in Brazil. *International Journal Technology Management*. 16 (8), 726–739. DOI: 10.1504/IJTM.1998.002693.

### Information about the author

**Galiyeva N. G.**, Postgraduate at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +7 707 75-64-605  
E-mail: nggaliyeva@gmail.com  
Galiyeva Nadezhda Gennad'evna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-36-47>

Оригинальная статья  
*Original paper*

УДК 004.312

## КОМБИНИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

А. А. ИВАНЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 05.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Показана практическая возможность реализации генераторов случайных чисел на программируемых логических интегральных схемах (англ. FPGA – field programmable gate arrays) путем комбинирования различных физически неклоняемых функций. Предложена компактная и масштабируемая схема цифрового источника случайных чисел на основе асинхронного триггера *D*-типа, сочетающая в себе характеристики физически неклоняемых функций как статической памяти, так и кольцевого осциллятора. В отличие от существующих генераторов случайных чисел предложенная схема может быть использована для решения задачи неклоняемой идентификации цифровых устройств. Приведены экспериментальные результаты, полученные при реализации предложенной схемы генератора на основе программируемых логических интегральных схем типа FPGA Xilinx Zynq. Описаны основные режимы функционирования, вероятностные и статистические характеристики числовых последовательностей, генерируемых предложенной схемой.

**Ключевые слова:** генератор случайных чисел, физически неклоняемые функции, программируемые логические интегральные схемы.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Автор выражает искреннюю благодарность резиденту Парка высоких технологий компании SK Hynix Memory Solutions Eastern Europe за предоставленное оборудование для проведения экспериментов в рамках работы совместной учебной лаборатории с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

**Для цитирования.** Иванюк, А. А. Комбинированный генератор случайных чисел на программируемых логических интегральных схемах / А. А. Иванюк // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 36–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-36-47>.

## COMBINED RANDOM NUMBER GENERATOR ON PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUITS

ALEXANDER A. IVANIUK

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 05.10.2022*

**Abstract.** The paper shows the practical possibility of implementing random number generators on field programmable gate arrays (FPGA) by combining various physically unclonable functions. A compact and scalable scheme of a digital random number source based on an asynchronous flip-flop of the *D*-type is proposed, which combines the characteristics of a static memory physically unclonable functions and a ring oscillator physically unclonable functions. Unlike existing random number generators, the proposed scheme can be used to solve the problem of unclonable identification of digital devices. The article presents experimental results obtained by the proposed generator circuit based on the FPGA Xilinx Zynq. The main modes of operation, probabilistic and statistical characteristics of numerical sequences, generated by the proposed scheme are described.

**Keywords:** random number generator, physically unclonable functions, programmable logic integrated circuits.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**Gratitude.** The author expresses his sincere gratitude to the HTP resident of the SK Hynix Memory Solutions Eastern Europe company for the equipment provided for carrying out experiments within the framework of the joint laboratory with the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**For citation.** Ivaniuk A. A. (2023) Combined Random Number Generator on Programmable Logic Integrated Circuits. *Digital Transformation*. 29 (1), 36–47. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-36-47> (in Russian).

## Введение

Генераторы случайных чисел (ГСЧ) находят широкое применение в таких приложениях, как компьютерное имитационное моделирование, криптографическая защита информации, тестирование и диагностика технических объектов, компьютерные игры, создание и обработка мультимедиа материалов и т. п. Генераторы случайных чисел по своей природе делятся на два класса: генераторы псевдослучайных чисел (ГПСЧ) и генераторы истинно случайных чисел (ГИСЧ). Построение ГПСЧ, как правило, осуществляется на основе некоторого определенного алгебраического правила, позволяющего получать последовательности чисел, близкие по своим характеристикам к случайным, но обладающие свойством воспроизводимости. В свою очередь, ГИСЧ вырабатывают последовательности чисел, каждый элемент которых практически невозможно вычислить либо предсказать, основываясь на информации о предыдущих элементах<sup>1</sup>. Исследованиям в области построения и анализа ГИСЧ посвящены многие работы как зарубежных, так и отечественных ученых, среди которых можно отметить научные школы академика Ю. С. Харина, профессора А. Е. Леусенко, Э. А. Бакановича и др.

В цифровых системах выделяют следующие источники случайности: физические, системные и основанные на действиях оператора<sup>1</sup>. В современных приложениях предпочтительными являются источники случайности, базирующиеся на физических процессах. Среди всего многообразия существующих методов синтеза ГИСЧ можно выделить класс относительно новых методов, основанных на хаотических, непредсказуемых физических процессах, происходящих внутри цифровых интегральных схем при их функционировании. Такие методы используют элементы цифровой схемотехники и не требуют реализации аналого-цифровых преобразований случайных физических величин для получения последовательностей случайных чисел. Методы объединяются под общим названием «физическая криптография» [1], в основе которой лежат физически неклонированные функции (ФНФ) [2].

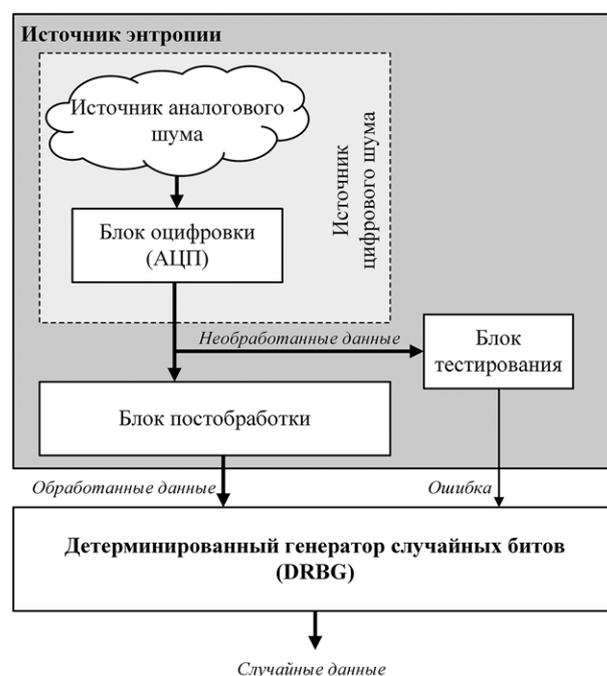
В статье рассмотрено новое схемотехническое решение на основе ФНФ для построения генераторов истинно случайных чисел. В отличие от существующих генераторов предлагаемый ГИСЧ обладает незначительной аппаратной избыточностью, легко масштабируется под различную разрядность генерируемых чисел и может применяться для решения задачи уникальной идентификации цифровых устройств.

## Общие подходы к построению генераторов случайных чисел

Генераторы случайных чисел, которые используются в составе готовых устройств, как правило, сертифицируются (стандартизируются) и должны соответствовать определенным рекомендациям (стандартам). Примерами таких рекомендаций могут служить документы NIST [3, 4], в которых описаны возможные подходы к построению аппаратных ГСЧ. На рис. 1 представлена обобщенная структура генераторов случайных чисел, рекомендованная NIST для криптографических приложений.

Согласно представленной на рис. 1 структуре, физически неклонированные функции являются перспективными источниками цифрового шума, которые не требуют наличия блока оцифровки (аналого-цифровых преобразователей) и могут проектироваться и изготавливаться как составные части цифровых систем на кристалле. Основные свойства ФНФ – неклонированность и случайность, обусловленные тем, что при изготовлении ФНФ с применением различных технологий невозможно создать две идентичные копии устройства (схемы), обладающие одинаковыми характеристиками.

<sup>1</sup> Информационные технологии и безопасность. Криптографические алгоритмы генерации псевдослучайных чисел: СТБ 34.101.47–2017. Введ. 01.09.2017. Минск, 2017. 18 с.



**Рис. 1.** Структура криптографического генератора случайных чисел согласно рекомендации NIST  
**Fig. 1.** The structure of the cryptographic random number generator according to the recommendation of NIST

Неповторимость значений характеристик обусловлена случайными вариациями физических структур материалов, геометрией межсоединительных проводников и компонент, влияние на которые со стороны изготовителя невозможно. Таким образом, ФНФ являются физическими источниками уникальности (неклонированности) и случайности. Вырабатываемые ФНФ случайные данные, как правило, не пригодны для применения, особенно в криптографических приложениях. Связано это с тем, что необработанные данные от ФНФ не обладают необходимыми статистическими свойствами. Например, такие данные могут не соответствовать заданному закону распределения для применения в конкретных приложениях.

Для решения описанной проблемы применяются различные методы и алгоритмы постобработки этих данных. В силу того, что происходящие физические процессы при генерации цифрового шума являются неконтролируемыми, могут происходить сбои в генерации случайных данных. Один из распространенных видов сбоев – так называемое залипание генерируемых случайных данных, выражающееся в многократном повторении одного и того же символа либо серии символов. Для обнаружения подобных сбоев, причинами которых могут быть и сторонние атаки злоумышленников, применяют специальные статистические тесты. По рекомендации NIST такими тестами являются Repetition Count Test (тест на последовательность одинаковых бит) и Adaptive Proportion Test (тест на пропорции повторяющихся бит). Если один из тестов не пройден, блок тестирования (рис. 1) генерирует сообщение об ошибке, сигнализирующее о том, что сгенерированные данные неслучайны. При прохождении тестов обработанные случайные данные поступают на блок DRBG (детерминированный генератор случайных битов), который, по сути, представляет собой генератор псевдослучайных чисел [3]. По рекомендациям NIST для реализаций блока DRBG могут быть использованы три криптографических метода – AES, SHA либо HMAC [4], обеспечивающих необходимый уровень криптостойкости.

Для построения схем ГИСЧ (источников цифрового шума) чаще всего применяют схемы ФНФ кольцевого осциллятора [2, 5]. Основная его особенность заключается в генерировании периодических сигналов с уникальной непредсказуемой частотой и фиксировании их случайного значения на триггерных схемах. В статье предлагается схема комбинированного генератора случайных чисел, в которой используются два типа ФНФ – кольцевого осциллятора и статической памяти [2], что позволяет в том числе вырабатывать уникальные идентификаторы цифровых устройств и проводить предварительную постобработку случайных данных.

### Схема комбинированного генератора истинно случайных чисел

Основу предлагаемой схемы ГИСЧ составляют асинхронный триггер *D*-типа LDE, инвертор INV, мультиплексор MUX и синхронный триггер *T*-типа TFF. На рис. 2 приведена базовая схема однобитного генератора истинно случайных чисел, имеющая следующие входы и выходы: *DI* – вход для внешних данных; *GE* – управляющий вход загрузки данных в триггер; *LE* – управляющий вход активации режима кольцевого осциллятора; *Q* – диагностический выход и выход для идентификационных данных; *RB* – основной выход случайных данных.

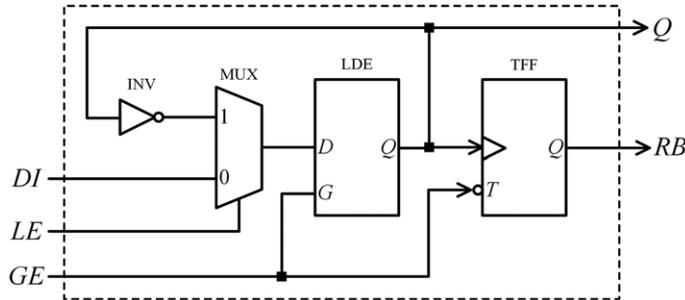


Рис. 2. Базовая схема комбинированного генератора истинно случайных чисел  
Fig. 2. The basic scheme of the combined random number generator

Техническая идея, лежащая в основе предложенной схемы, заключается в комбинировании различных схем ФНФ с целью реализации ГИСЧ, обладающего свойством технологической невоспроизводимости и позволяющего, в том числе, решать задачу неклонированной идентификации. Представленную на рис. 2 схему можно разделить на четыре функциональные части: регистр хранения LDE с возможностью записи внешних данных *DI* и выходом *Q*; источник уникального бита идентификации, которым является триггер LDE в режиме инициализации (выход *Q*); управляемый кольцевой генератор, образующийся при значении  $LE = 1$  и включающий в себя схему триггера LDE, инвертора INV и мультиплексора MUX; схема генерирования случайного значения на выходе *RB*, представленная синхронным *T*-триггером TFF. В общем случае вся схема способна выработать случайные значения на обоих выходах *Q* и *RB*.

Следует отметить, что предложенная схема может быть реализована различными способами в зависимости от технологии и библиотечных функциональных элементов. Например, для FPGA-технологии схемная реализация генератора может представлять собой два LUT-блока и два триггера. Однако для обеспечения непредсказуемости поведения схемы в режиме инициализации схему асинхронного триггера лучше реализовать также на LUT-блоках (U0 и U1), как это показано на рис. 3.

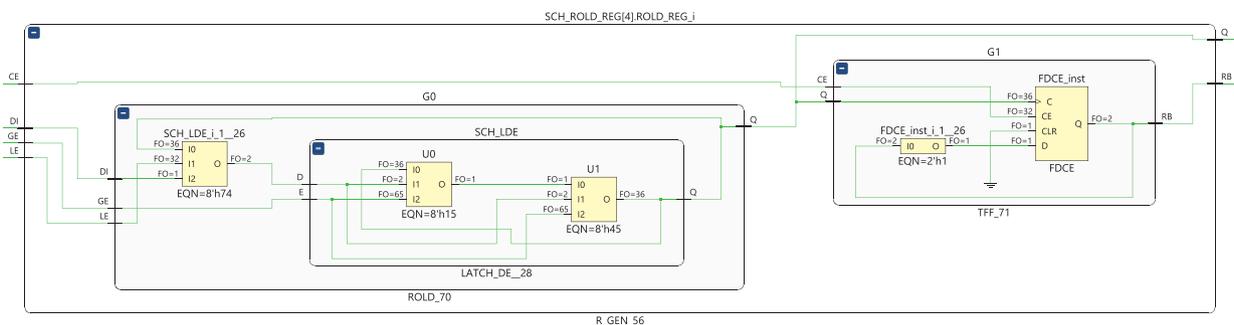


Рис. 3. Схемная реализации генератора на ресурсах FPGA  
Fig. 3. Schematic implementation of the generator on FPGA resources

Рассмотрим подробнее режимы функционирования предложенной схемы.

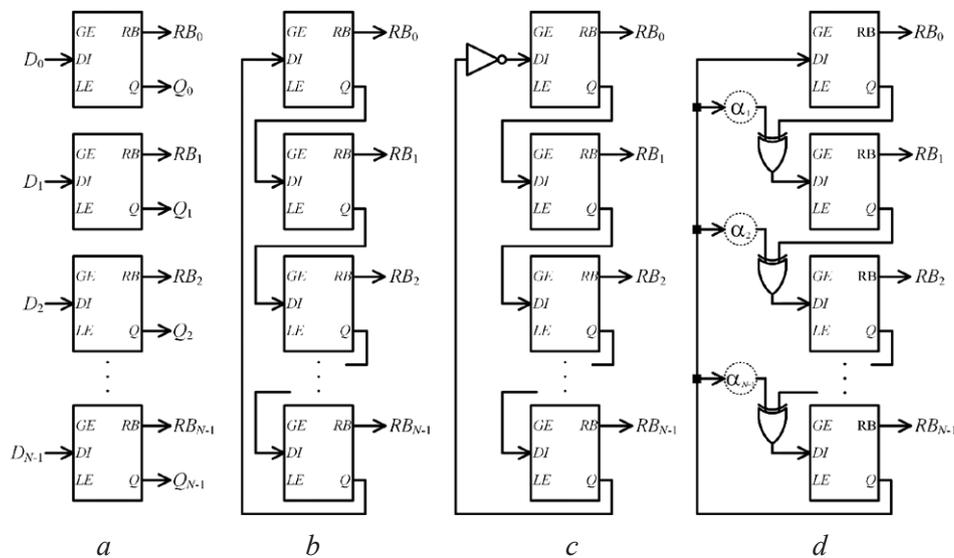
1. *Режим инициализации.* В данный режим схема попадает при включении питания и удержании управляющего сигнала  $GE = 0$ . При такой конфигурации начальное значение на выходе  $Q = X (X \in \{0, 1\})$  будет случайным и непредсказуемым и схожим по поведению с ФНФ статической памяти [2]. С учетом реализации триггера TFF на FPGA с использованием примитива FDCE (рис. 3) начальное значение на выходе *RB* в режиме инициализации будет всегда постоянным и предсказуемым.

2. *Режим кольцевого осциллятора.* Достигим при установке управляющих сигналов  $LE = 1$  и  $GE = 1$ . В данном случае образуется отрицательная обратная связь, соединяющая выход  $Q$  триггера LDE со входом  $D$  через схему инвертора INV. При этом на выходе  $Q$  всей схемы будет наблюдаться последовательная смена значений с частотой  $F_Q$ , определяемой задержками распространения сигнала через все структурные элементы схемы, включая задержки на линиях межсоединений. Такая конфигурация схемы идентична схеме ФНФ кольцевого осциллятора [2, 5], при этом значение  $F_Q$  будет являться уникальным и непредсказуемым.

3. *Режим загрузки данных.* Активируется при установке управляющих сигналов  $LE = 0$  и  $GE = 1$ . При этом значение  $d$ , поданное на вход  $DI$ , будет записано в триггер LDE и отображено на выходе  $Q = d$  всей схемы.

4. *Режим хранения.* Схож с режимом инициализации, но отличается тем, что в него схема переходит после режима кольцевого осциллятора либо после режима загрузки данных. В случае переключения сигнала  $GE = 1 \rightarrow 0$  при  $LE = 0$  значение на выходе  $Q$  будет равно  $d$ , когда  $GE = 1 \rightarrow 0$  при  $LE = 1$  зафиксированные значения на выходах  $Q$  и  $RB$  будут случайными и непредсказуемыми в силу многих факторов, которые описаны ниже.

Предложенная схема может быть расширена до  $N$ -разрядной путем объединения в регистровую схему с общим управлением по входам  $LE$  и  $GE$  и  $N$ -разрядными выходными шинами  $Q$  и  $RB$ . Это позволяет расширить функционал схемы, например, путем построения  $N$ -разрядных генераторов циклических последовательностей. На рис. 4 представлены некоторые варианты реализации различных схем многоразрядных генераторов на основе базовой схемы однобитного ГИСЧ.



**Рис. 4.** Примеры схем: *a* – регистра хранения; *b* – генератора циклической последовательности; *c* – генератора последовательности Джонсона; *d* – генератора М-последовательности  
**Fig. 4.** Examples of schemes: *a* – of a storage register; *b* – of a cyclic sequence generator; *c* – of the Johnson sequence generator; *d* – of M-sequence generator

Схема регистра хранения (рис. 4, *a*) может функционировать во всех описанных режимах базовой схемы. В такой конфигурации схема представляет собой  $N$  независимых однобитных источников случайных данных, выполняющих роль разрядов регистра случайного числа с возможностью загрузки внешних данных. Варианты схем, представленных на рис. 4, *b–d*, осуществляют в режиме 3 (загрузка данных) генерацию различных последовательностей: циклической, Джонсона и М-последовательности соответственно.

В режиме 1 (инициализация) все схемы будут находиться в режиме ФНФ статической памяти и вырабатывать уникальные значения на своих выходах  $Q_0–Q_{N-1}$ , которые можно использовать для генерирования неклонируемых  $N$ -разрядных идентификаторов (встроенных аппаратных водяных знаков), позволяющих решать задачу аутентификации цифровых устройств.

В режиме 2 (кольцевой осциллятор) все представленные схемы будут функционировать как  $N$  независимых ФНФ кольцевого осциллятора, вырабатывая на выходах  $Q_0–Q_{N-1}$  случайные символы с различными статистическими и вероятностными характеристиками. Переключая схемы из режима 2 в режим 4 (хранение), сгенерированные случайные значения будут зафиксированы на базовых элементах, которые, в свою очередь, могут служить начальными значениями для схем

генераторов различных детерминированных (псевдослучайных) последовательностей, а на выходах  $RB_0-RB_{N-1}$  будут дополнительно вырабатываться случайные символы, отличные от тех, которые появятся на выходах  $Q_0-Q_{N-1}$ .

### Экспериментальная часть

Для проверки статистических и вероятностных характеристик предложенных схем была спроектирована аппаратно-программная система проведения экспериментов на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) типа FPGA Xilinx Zynq XC7Z010, входящая в состав платы быстрого прототипирования Digilent Zybo Z7<sup>2</sup>. Система построена на основе встроенного процессора ARM Cortex-A9, служащего для управления схемой генератора и обмена данными с рабочей станцией. Схема генератора была спроектирована на языке VHDL с параметром  $N = 32$  и дополнена устройством управления, блоками анализа частот каждого вывода генератора.

В первом эксперименте осуществлялась генерация уникального 32-битного идентификатора путем многократного включения системы в режиме инициализации. Для этого использовали четыре идентичные платы Digilent Zybo Z7, сконфигурируемые одним и тем же bit-образом проекта. Для каждого экземпляра экспериментальной схемы оценивалась вероятность встречаемости единичного символа на каждом выходе

$$P_i^1(Q_i^d, E) = \frac{1}{E} \sum_{e=1}^E Q_i^d, \quad (1)$$

где  $Q_i^d \in \{0,1\}$  – значение символа на  $i$ -м выходе схемы ( $i \in [0, N-1]$ ), реализованной на плате с индексом  $d \in [1, D]$ ;  $D, E$  – число плат и экспериментов соответственно.

На рис. 5 приведены значения  $P_i^1(Q_i^d, E)$  для следующих параметров:  $N = 32, D = 4, E = 100$ .

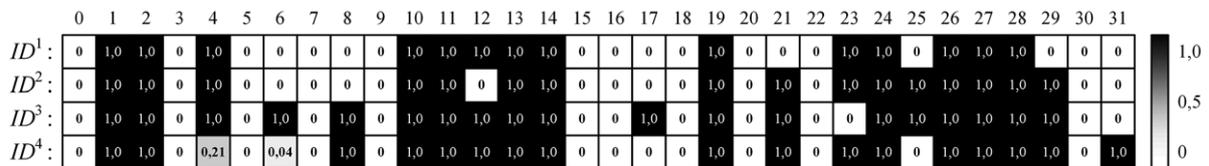


Рис. 5. Тепловая карта значений  $P_i^1(Q_i^d, E)$  для четырех реализованных систем  
Fig. 5. Heat map of  $P_i^1(Q_i^d, E)$  values for four implemented systems

Как видно из рис. 5, подавляющее большинство разрядов имеют стабильные значения, для которых  $P_i^1(Q_i^d, E) = 0$  либо  $P_i^1(Q_i^d, E) = 1$ . В силу того, что базовая схема асинхронного  $D$ -триггера в своей основе представляет собой управляемый бистабильный элемент (асинхронный  $RS$ -триггер), наличие асимметрии в реализации конкретного экземпляра этой схемы определяет его стабильное начальное значение. Меньшая асимметрия внутренней реализации триггера приводит схему в метастабильное состояние, при котором  $0 < P_i^1(Q_i^d, E) < 1$ . Так, полученное значение  $P_4^1(Q_4^d, 100) = 0,21$  свидетельствует о более высокой степени симметрии схемы триггера в сравнении с остальными.

Примем полученные для всех плат значения в качестве значений разрядов их идентификаторов и оценим основные характеристики (стабильность, уникальность, единообразие), которые применяются в том числе для оценки ФНФ [6]. Сперва введем понятие идеального  $N$ -разрядного идентификатора устройства, значение которого получается по следующему мажоритарному правилу:  $ID^d = \{id_0^d, id_1^d, id_2^d, \dots, id_{N-1}^d\}$ , где  $id_i^d = 0$  – если  $P_i^1(Q_i^d, E) < 0,5$ , и  $id_i^d = 1$  – если  $P_i^1(Q_i^d, E) \geq 0,5$ . Оценим стабильность идентификаторов по следующей формуле:

$$S(ID^d) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |id_i^d - P_i^1(Q_i^d, E)|. \quad (2)$$

По сути, значение  $S(ID^d)$  есть величина, обратная коэффициенту битовых ошибок BER (Bit Error Rate) при многократном извлечении значения идентификатора. Таким образом, получаем:

<sup>2</sup> ZyboZ7: Zynq-7000 ARM/FPGA SoC Development Board [Electronic Resource]. Mode of access: <https://digilent.com/reference/programmable-logic/zybo-z7/start>. Date of access: 19.09.2022.

$S(ID^1) = S(ID^2) = S(ID^3) = 1$  и  $S(ID^4) = 0,9921$ . Для оценки уникальности идентификаторов используем удельное расстояние по Хэммингу между двумя бинарными  $N$ -разрядными векторами

$$HD_N^{a,b} = \frac{1}{N} HD(ID^a, ID^b), \quad (3)$$

где  $HD$  – расстояние по Хэммингу между векторами  $ID^a$  и  $ID^b$ ,  $a, b \in [1, D]$ .

В ходе анализа экспериментальных данных получены следующие значения:  $HD_{32}^{1,2} = 0,125$ ,  $HD_{32}^{1,3} = 0,21875$ ,  $HD_{32}^{1,4} = HD_{32}^{2,3} = HD_{32}^{2,4} = 0,15625$ ,  $HD_{32}^{3,4} = 0,1875$ . Удельную уникальность вычисляли как среднее арифметическое значений  $HD_N^{a,b}$  всех возможных пар  $C_D^2$  идентификаторов из  $D$  возможных [6]

$$U^D = \frac{1}{C_D^2} \cdot \sum_{a=1}^{C_D^2-1} \sum_{b=a+1}^{C_D^2} HD_N^{a,b}. \quad (4)$$

Для рассматриваемого случая  $U^4 = 0,1666$ , при этом минимальное значение удельной уникальности для различных четырех 32-битных идентификаторов равно 0,04166. При оценке идентификаторов часто применяют дополнительную метрику единообразия [6], которая отражает в них соотношение нулевых и единичных символов:

$$UF(ID^d) = 1 - 2 \cdot \left| \frac{WH(ID^d)}{N} - 0,5 \right|, \quad (5)$$

где  $WH(ID^d)$  – вес по Хэммингу двоичного вектора  $ID^d$ .

Полученные идентификаторы обладают высоким значением данной метрики:  $UF(ID^1) = 0,875$ ,  $UF(ID^2) = 1,0$ ,  $UF(ID^3) = 0,8125$ ,  $UF(ID^4) = 0,9375$ . Приведенные значения стабильности, уникальности и единообразия свидетельствуют о потенциальной возможности практического применения данного подхода для реализации неклонировуемых аппаратных идентификаторов, в том числе для решения задач защиты авторских прав на цифровые системы.

Следующим этапом эксперимента стала оценка частот вырабатываемых сигналов в режиме кольцевого осциллятора. Измерения частот сигналов  $F(Q_i^d)$ , вырабатываемых на выходах  $Q_0-Q_{N-1}$ , проводились дополнительными схемами контроля, реализованными на ПЛИС, во временном окне  $MW = kP_{SYS\_CLK} = 1,32$  мс для всех четырех экземпляров генератора ( $k$  – коэффициент масштабирования,  $k = 65536$ ;  $P_{SYS\_CLK}$  – период системного синхросигнала,  $P_{SYS\_CLK} = 20$  нс).

На рис. 6 представлены графики значений измеренных частот  $F(Q_i^d)$ .

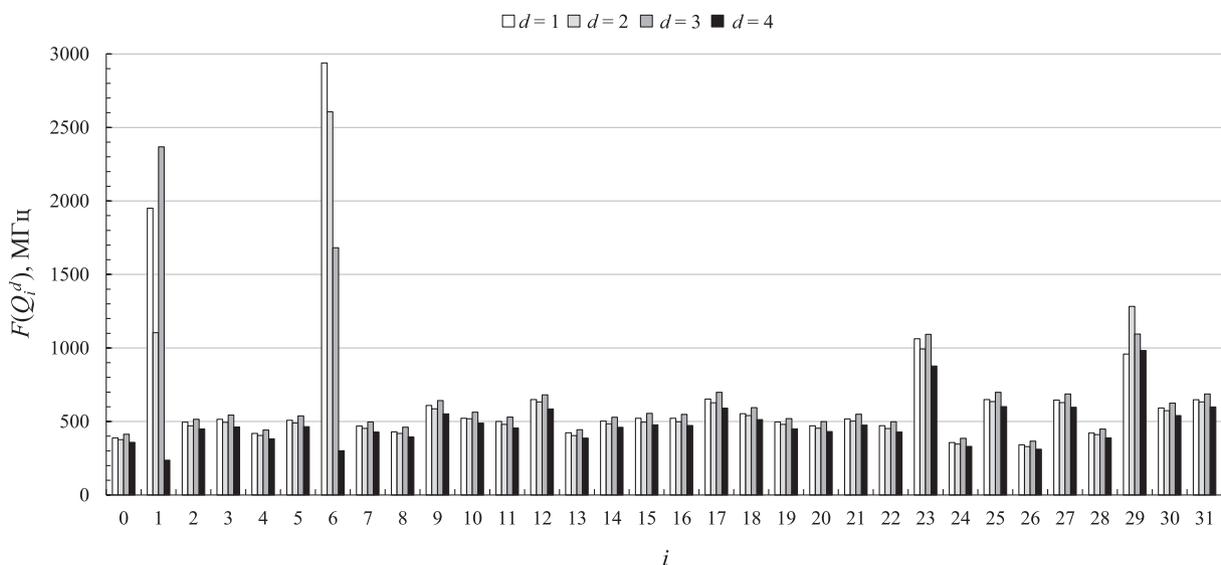


Рис. 6. Измеренные частоты  $F(Q_i^d)$  на четырех различных FPGA  
Fig. 6. Measured frequency  $F(Q_i^d)$  values on four different FPGAs

Как видно из графиков, значения  $F(Q_i^d)$  различаются как по разрядам генератора, так и по версиям его реализации на различных ПЛИС. Измерения частот проводились при последовательном переключении генераторов из режима 1 в режим 2 и далее в режим 4.

Присутствующие на графиках рис. 6 выбросы (позиции  $i = 1$  и  $i = 6$ ), скорее всего, обусловлены высокочастотными колебаниями, которые, в свою очередь, привели к аномальному функционированию измеряющих счетчиков, реализованных также на ресурсах FPGA. Тем не менее представленные экспериментальные данные являются подтверждением основных положений ФНФ, в частности, уникальности и неклонированности ФНФ кольцевых генераторов.

При завершении режима осцилляции с дальнейшим переходом в режим хранения на асинхронных триггерах LDE может наблюдаться эффект автоколебаний, вызванный нарушением временных параметров предустановки и удержания сигналов на входах  $D$  и  $G$ . Подобный эффект впервые был описан в [7] и использован при анализе поведения ФНФ типа арбитр [8]. Для наблюдения эффекта автоколебаний в предложенной схеме выполнили ряд экспериментов, в которых проводили регистрацию числа передних фронтов автоколебаний  $A(Q_i^d, k)$  после завершения режима 2 во временном окне  $MW = kP_{SYS\_CLK}$  с переходом в режим 4. В табл. 1 представлены усредненные значения  $A(Q_i^d, k)$  для  $k = 1$  на повторяющихся 100 запусках четырех систем.

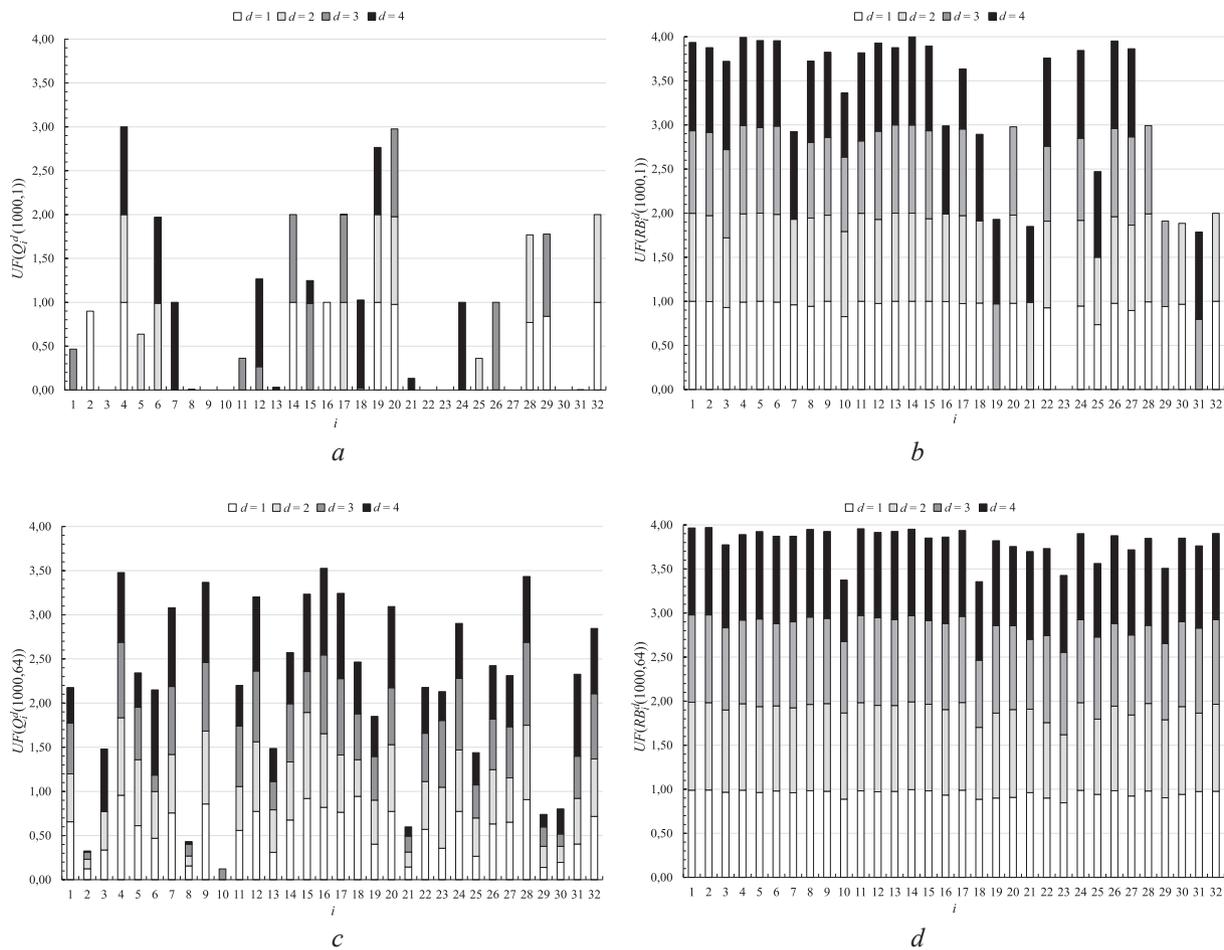
**Таблица 1.** Средние значения  $A(Q_i^d, k)$  для четырех реализаций на различных FPGA

**Table 1.** Average values of  $A(Q_i^d, k)$  for four implementations on different FPGAs

$d$	$i$															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	26	2	5	4	3	4	1	7	70	3	3	6	2	6	0	2
2	46	1	4	2	3	3	1	3	34	2	7	11	1	42	1	1
3	4	1	11	4	2	1	1	2	9	1	0	13	0	6	3	3
4	11	2	4	3	6	3	2	4	0	3	0	9	0	13	1	3
$d$	$i$															
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1	2	2	1	1	14	6	40	64	6	1	5	1	11	7	4	2
2	2	2	2	2	12	1	5	19	5	1	5	1	33	23	4	1
3	2	0	1	1	11	1	5	8	3	1	3	2	6	4	2	1
4	2	2	2	4	9	4	8	27	14	2	14	2	6	55	4	0

В совокупности с имеющимися различными частотами  $F(Q_i^d)$  и подавляющим числом триггеров, обладающих описанным эффектом, для которых значение  $A(Q_i^d, k) > 0$ , выдвинем предположение, что представленная схема комбинированного генератора может быть использована в качестве источника цифрового шума. Для подтверждения этого предположения при помощи формулы (5) оценим соотношение вырабатываемых нулевых и единичных символов на выходах  $Q$  и  $RB$  каждым  $i$ -м генератором на серии из  $E = 1000$  повторяющихся экспериментов для различных значений коэффициента масштабирования  $k$ . Пусть  $q_i^d(e, k) \in \{0, 1\}$  и  $rb_i^d(e, k) \in \{0, 1\}$  есть значения, вырабатываемые генератором с индексом  $i$  на FPGA с номером  $d$  в ходе эксперимента  $e \in [1, E]$  и коэффициентом масштабирования  $k$  на выходе  $Q$  и  $RB$  соответственно. Оценим значение метрики единообразия (5) для векторов  $Q_i^d(E, k) = \{q_i^d(1, k), q_i^d(2, k), q_i^d(3, k), \dots, q_i^d(E, k)\}$  и  $RB_i^d(E, k) = \{rb_i^d(1, k), rb_i^d(2, k), rb_i^d(3, k), \dots, rb_i^d(E, k)\}$ , полученных для всех генераторов на четырех FPGA путем их переключения в режим 2, удержания в этом режиме на протяжении  $k$  периодов  $P_{SYS\_CLK}$  с дальнейшим переключением в режим 4.

На рис. 7 приведены значения метрик  $UF(Q_i^d(E, k))$  и  $UF(RB_i^d(E, k))$  для  $k = 1$  и  $k = 64$ . Так, для  $k = 1$  наблюдается подавляющее большинство нулевых значений (87 из 128 возможных)  $UF(Q_i^d(E, k)) = 0$ , обусловленных выработкой постоянного значения на выходах  $Q$ . Одновременное измерение значений на выходах  $RB$  дало всего лишь 21 значение  $UF(RB_i^d(E, k)) = 0$ . При увеличении коэффициента масштабирования до  $k = 64$  число значений  $UF(Q_i^d(E, k)) = 0$  сократилось до четырех, а  $UF(RB_i^d(E, k)) = 0$  – до нуля. При этом абсолютные значения  $UF(RB_i^d(E, k))$  близки к максимальному единичному значению, что удовлетворяет условию прохождения теста на пропорцию повторяющихся бит.



**Рис. 7.** Гистограммы с накоплением значений метрики единообразия для векторов:  
 $a - Q_i^d(1000,1)$ ;  $b - RB_i^d(1000,1)$ ;  $c - Q_i^d(1000,64)$ ;  $d - RB_i^d(1000,64)$

**Fig. 7.** Stacked histograms of uniformity metric values for vectors:  
 $a - Q_i^d(1000,1)$ ;  $b - RB_i^d(1000,1)$ ;  $c - Q_i^d(1000,64)$ ;  $d - RB_i^d(1000,64)$

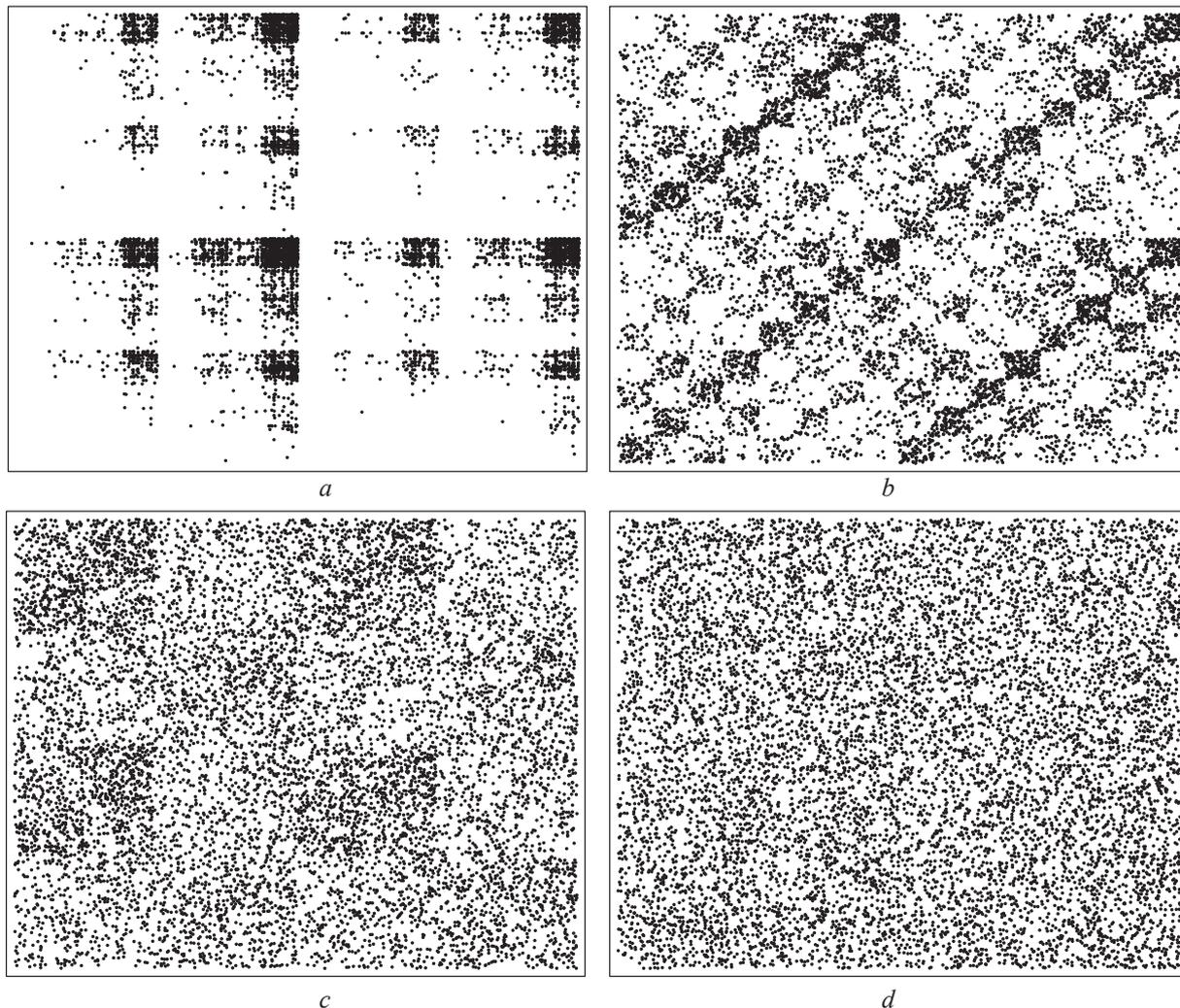
Проведенные эксперименты для различных значений  $k$  свидетельствуют о целесообразности использования выходов  $RB$  генераторов в качестве источников цифрового шума. Установлено, что при  $k \geq 16$  все генераторы, реализованные на четырех FPGA, дают значение  $UF(RB_i^d(E, k)) \neq 0$ , тем самым способны успешно пройти тест на последовательность одинаковых бит.

В табл. 2 приведены данные о числе нулевых метрик  $UF(Q_i^d(E, k))$  и  $UF(RB_i^d(E, k))$  для различных значений  $k$ . Следует отметить, что дальнейшее увеличение  $k$  не способствует регистрации ненулевой метрики  $UF(Q_i^d(E, k))$  на выходах четырех генераторов  $Q_3^1$ ,  $Q_{10}^1$ ,  $Q_{10}^2$  и  $Q_{10}^4$ .

**Таблица 2.** Число нулевых значений метрик единообразия для различных  $k$   
**Table 2.** Number of zero values of uniformity metrics for different  $k$

$d$	$UF(Q_i^d(E, k)) = 0 / UF(RB_i^d(E, k)) = 0$						
	$k$						
	1	2	4	8	16	32	64
1	23/4	14/2	6/0	8/1	1/0	1/0	1/0
2	23/4	14/3	8/0	4/0	2/0	1/0	1/0
3	20/7	20/6	12/2	4/0	3/0	1/0	1/0
4	21/6	16/5	15/4	4/1	4/0	1/0	1/0

Оценим поведение генераторов в старт-стопном режиме последовательной выработки 32-разрядных случайных чисел с выходов  $Q$  и  $RB$ , давая всем схемам работать во временном окне  $MW$  в режиме 2 с последующим переключением в режим 4. Для быстрой и визуальной оценки качества вырабатываемых последовательностей использовали графический тест «Распределение на плоскости» для  $10^4$  последовательно полученных чисел. На рис. 8 изображены результаты графических тестов для FPGA с индексом  $d = 1$  для  $k = 64$ .

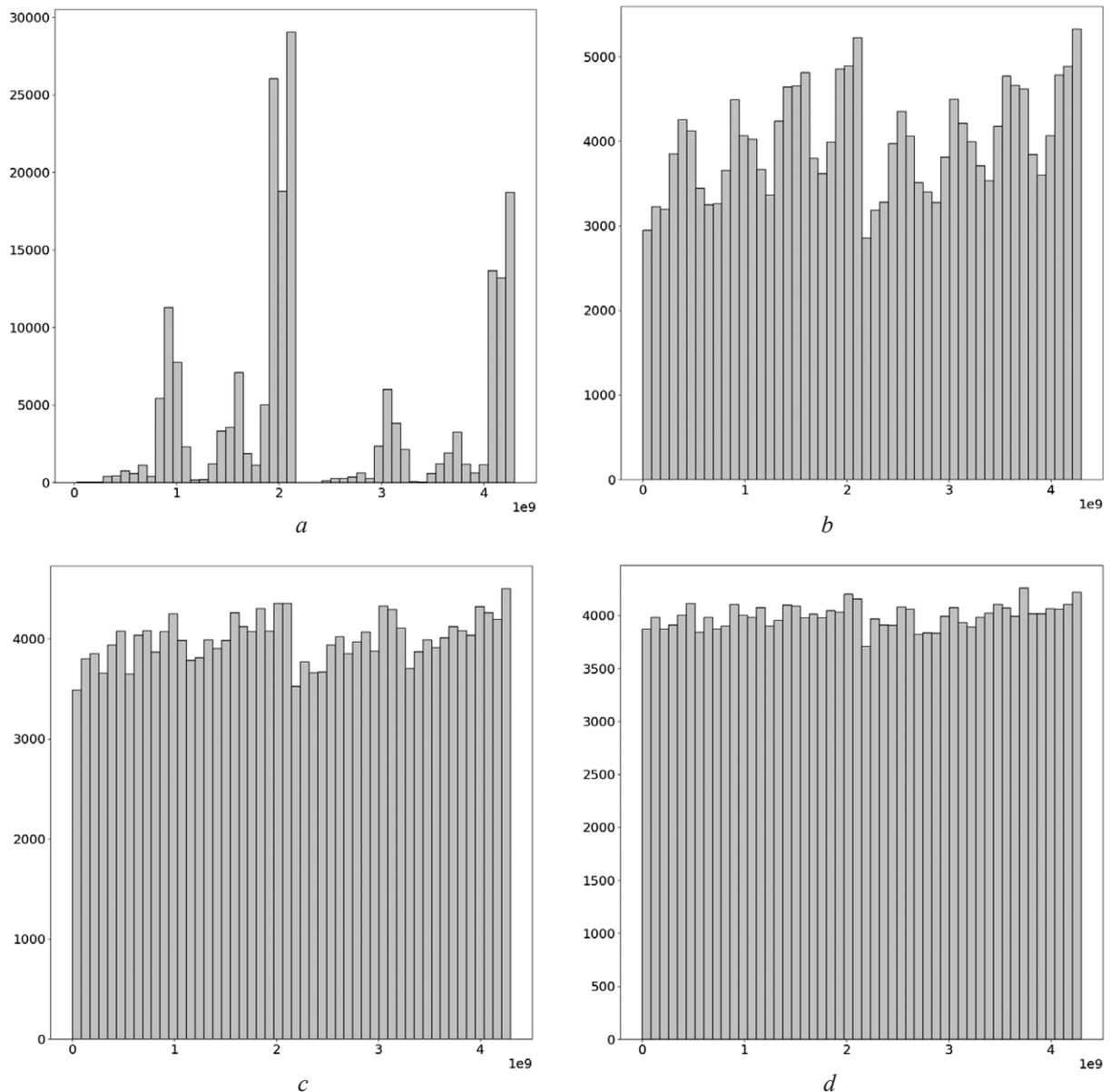


**Рис. 8.** Результаты графических тестов в различных режимах для значений:  $a, b$  – с выходов  $Q$  и  $RB$ ;  $c, d$  – с выходов  $RB$  в режимах счетчика Джонсона и генератора М-последовательности соответственно

**Fig. 8.** Results of graphics tests in various modes for values:  $a, b$  – from outputs  $Q$  and  $RB$ ;  $c, d$  – from  $RB$  outputs in the Johnson counter mode and in M-sequence generator mode respectively

Как показали эксперименты, выход  $RB$  предложенной схемы генератора является предпочтительным в сравнении с выходом  $Q$  (рис. 8,  $a, b$ ). Обусловлено это наличием  $T$ -триггера, выполняющего роль сумматора по модулю 2 значений, которые вырабатываются на выходе асинхронного триггера LDE в режиме остановки функционирования с наблюдаемым эффектом автоколебания. Для устранения неравномерности вырабатываемых значений можно сконфигурировать генераторы в схемы многоразрядных генераторов (рис. 4). Так, на рис. 8,  $c$  представлен результат тестирования генератора в режиме счетчика Джонсона, а на рис. 8,  $d$  – в режиме генератора М-последовательности, реализованного по порождающему полиному  $\varphi(x) = 1 + x + x^5 + x^6 + x^{32}$ , показавшему наилучший результат.

На рис. 9 представлены гистограммы распределения сгенерированных 32-разрядных случайных чисел четырьмя описанными выше модификациями генераторов. Объем выборки для всех генераторов составил  $2 \cdot 10^5$ , число интервалов для построения гистограмм выбрано равным 50.



**Рис. 9.** Гистограммы распределения случайных чисел, полученных с выходов:  $a, b - Q$  и  $RB$ ;  $c, d - RB$  в режимах счетчика Джонсона и генератора М-последовательности

**Fig. 9.** Histograms of distribution of random numbers obtained:  $a, b -$  from outputs  $Q$  and  $RB$ ;  $c, d -$  from  $RB$  outputs in the Johnson counter mode and in  $M$ -sequence generator mode

## Заключение

1. Предложена схема комбинированного генератора случайных чисел, основанная на двух типах физически неклонлируемых функций – статической памяти и кольцевого осциллятора. В режиме физически неклонлируемых функций статической памяти генератор способен вырабатывать уникальные неклонлируемые идентификаторы, которые могут быть использованы как в схемах аутентификации, так и для защиты авторских прав на разрабатываемые цифровые устройства. В старт-стопном режиме кольцевого осциллятора генератор вырабатывает случайные значения, которые фиксируются схемой асинхронного триггера и могут храниться для последующего использования, например, для построения не только регистровых схем, но и схем генераторов псевдослучайных последовательностей. При завершении осцилляции на выходе асинхронного триггера фиксируются случайные автоколебания, которые детектируются и обрабатываются дополнительным синхронным  $T$ -триггером, входящим в состав схемы генератора. Эксперименты,

проведенные на кристаллах FPGA, показали, что случайные значения, вырабатываемые на выходе  $T$ -триггера, обладают лучшим показателем соотношения нулевых и единичных символов в генерируемых последовательностях по сравнению со схемой кольцевого осциллятора.

2. Базовая схема предложенного генератора может быть использована для построения схем постобработки случайных данных. Построенная таким образом схема генератора  $M$ -последовательности способна вырабатывать равномерные случайные данные с успешным прохождением базовых тестов Repetition Count Test и Adaptive Proportion Test.

## References

1. Costiuc M., Maimut D., Teseleanu G. (2019) Physical Cryptography. *IACR Cryptology ePrint Archive*. Available: <https://eprint.iacr.org/2019/1235.pdf> (Accessed 19 September 2021).
2. Yarmolik V. N., Vashinko Ju. G. (2011) Physically Unclonable Functions. *Informatika*. 30 (2), 92–103 (in Russian).
3. Barker E., Kelsey J. (2015) Recommendation for Random Number Generation Using Deterministic Random Bit Generators. *NIST Special Publication 800-90A*. Available: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.800-90Ar1> (Accessed 19 September 2022).
4. Turan M. S., Barker E., Kelsey J., McKay K. A., Baish M. L., Boyle M. (2018) Recommendation for the Entropy Sources Used for Random Bit Generation. *NIST Special Publication 800-90B*. Available: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-90B> (Accessed 19 September 2022).
5. Buchovecka S., Lorencz R., Kodytek F., Buček J. (2017) True Random Number Generator Based on Ring Oscillator PUF Circuit. *Microprocessors and Microsystems*. 53, 33–41.
6. Athanas P., Pnevmatikatos D., Sklavos N. (eds.) (2013) A Systematic Method to Evaluate and Compare the Performance of Physical Unclonable Functions. *Embedded Systems Design with FPGAs*. New York, Springer. 245–267.
7. Kacprzak T. (1988) Analysis of Oscillatory Metastable Operation of an RS Flip-Flop. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 23 (1), 260–266.
8. Zalivaka S. S., Ivaniuk A. A., Chang Ch. H. (2018) Reliable and Modeling Attack Resistant Authentication of Arbiter PUF in FPGA Implementation with Trinary Quadruple Response. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 14 (4), 1109–1123.

## Сведения об авторе

**Иваниук А. А.**, д. т. н., доцент, профессор кафедры информатики, заведующий совместной учебной лабораторией «СК хайникс мемори солюшнс Восточная Европа» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: + 375 17 293-80-66  
E-mail: [ivaniuk@bsuir.by](mailto:ivaniuk@bsuir.by)  
Иваниук Александр Александрович

## Information about the author

**Ivaniuk A. A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Comp. Sci. Department, Head of the Joint Educational Laboratory “SK Hynix memory solutions Eastern Europe” of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-80-66  
E-mail: [ivaniuk@bsuir.by](mailto:ivaniuk@bsuir.by)  
Ivaniuk Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-48-56>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.89

## ПОДХОД К ПРОВЕРКЕ ОТВЕТОВ НА ОБЪЕКТИВНЫЕ ВОПРОСЫ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ

ВЭНЬЦЗУ ЛИ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 25.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Рассмотрен подход к разработке решателя задач для автоматической проверки ответов на объективные вопросы в интеллектуальных обучающих системах, построенных с использованием технологии OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems – открытая семантическая технология проектирования интеллектуальных систем). В рамках OSTIS решатели задач были разработаны на основе мультиагентной технологии. Предлагаемый решатель задач инициирует соответствующий набор sc-агентов согласно типу вопросов и автоматически проверяет правильность и полноту ответа пользователя на семантическом уровне. Проверка ответов на объективные вопросы является лишь одним из основных назначений разработанного решателя задач, который также позволяет вычислять подобие между любыми двумя семантическими графами.

**Ключевые слова:** решатель задач, проверка ответов, технология OSTIS, интеллектуальные обучающие системы, база знаний.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Вэньцзу Ли. Подход к проверке ответов на объективные вопросы в интеллектуальных обучающих системах / Вэньцзу Ли // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 48–56. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-48-56>.

## AN ANSWER VERIFICATION APPROACH TO OBJECTIVE QUESTIONS IN INTELLIGENT TUTORING SYSTEMS

WENZU LI

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 25.10.2022*

**Abstract.** An approach to develop a problem solver for automatic answer verification to objective questions in intelligent tutoring systems constructed using OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems) technology is considered. The problem solver is developed based on multi-agent technology within OSTIS. The proposed problem solver automatically verifies the correctness and completeness of the user's answer at the semantic level by starting the corresponding sc-agent sets according to the type of the questions. The objective question answer verification is one of the main purposes of the developed problem solver, it can also perform the calculation of the similarity between any two semantic graphs.

**Keywords:** problem solver, answer verification, OSTIS technology, intelligent tutoring systems, knowledge base.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Wenzu Li (2023) An Answer Verification Approach to Objective Questions in Intelligent Tutoring Systems. *Digital Transformation*. 29 (1), 48–56. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-48-56> (in Russian).

## Введение

С развитием современных информационных технологий искусственный интеллект широко применяется в сфере образования. А это может не только повысить эффективность обучения учащихся, но и стать важным средством обеспечения справедливости образования. После вспышки COVID-19 в 2020 году была особенно подчеркнута важность и актуальность разработки интеллектуальных обучающих систем (ИОС) [1].

Автоматическая проверка ответов является одной из важнейших функций ИОС, которая позволяет быстро проверить уровень знаний пользователей. В соответствии с типами вопросов автоматическая проверка ответов делится на объективные и субъективные вопросы. К объективным относятся вопросы, имеющие уникальный стандартный ответ. Объективные вопросы включают: вопрос на выбор, вопрос на заполнение пробелов и вопрос суждения. Субъективные вопросы не имеют уникальных ответов, а общие из них включают вопросы на доказательство, на толкование определений и решение задач [2]. По сравнению с проверкой ответов на объективные вопросы, проверка ответов на субъективные значительно сложнее и требует других аспектов знаний, таких как логические рассуждения, логика предикатов и т. д. Рассмотрим реализацию подходов к проверке ответов на объективные вопросы.

В традиционных обучающих системах основной принцип проверки ответов на объективные вопросы заключается в сравнении того, соответствует ли строка стандартного ответа строке ответа пользователя. Однако в ИОС объективные вопросы и соответствующие стандартные ответы хранятся в базе знаний в виде семантических графов, поэтому основой проверки ответов является вычисление подобия между стандартным ответом в виде семантического графа и ответом пользователя в виде семантического графа. Семантический граф – это неориентированный граф (или направленный), который визуально представляет семантические отношения между понятиями [3]. Подобие между семантическими графами – степень семантической близости между двумя любыми семантическими графами в базе знаний. Когда получено подобие между ответами на объективные вопросы, об окончательной полноте и о правильности текущего вопроса можно судить, комбинируя стратегию оценки соответствующего вопроса.

С развитием технологии семантических сетей были предложены некоторые подходы к вычислению подобия между семантическими графами, но они могут вычислять подобие только между семантическими графами с очень простыми семантическими структурами [4]. С созданием баз знаний по различным дисциплинам необходимо описывать все больше и больше видов знаний (например, нечеткие знания, темпоральные знания и т. д.), поэтому существующие подходы к вычислению подобия между семантическими графами больше не могут удовлетворять текущим задачам [3]. В статье предложен подход к разработке решателя задач для автоматической проверки ответов на объективные вопросы в обучающих системах, построенных с использованием технологии OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems – открытая семантическая технология проектирования интеллектуальных систем) [3, 5]. Одним из ключевых компонентов каждой OSTIS-системы (семантической компьютерной системы, построенной в соответствии со стандартом технологии OSTIS) является решатель задач, который обеспечивает возможность решения различных задач.

С помощью разработанного решателя задач можно вычислять подобие между любыми двумя семантическими графами в OSTIS-системах. Его также можно использовать для решения других задач в будущем, таких как проверка ответов на субъективные вопросы, интеграция знаний и т. д. Следует подчеркнуть, что текст на естественном языке (ответы пользователей) преобразуется в структуру семантического графа с помощью естественно-языкового интерфейса. В [6] подробно представлен подход к разработке естественно-языкового интерфейса по китайскому языку. В качестве демонстрационной системы выбрана система по дискретной математике, разрабатываемая с помощью технологии OSTIS.

## Существующие подходы и проблемы

С развитием смежных технологий, таких как семантические сети и обработка естественного языка (NLP), вычисление подобия текстов (например, ответы пользователей на естественном языке) на основе семантических сетей стало основным направлением исследований. Главный принцип этого типа подходов заключается в том, чтобы сначала использовать такие инструменты, как деревья синтаксического анализа или естественно-языковые интерфейсы для преобразования текстов на естественном языке в семантические графы, а затем вычислять подобие между семантическими графами, чтобы получить подобие между текстами. Наиболее представительный подход этого типа – SPICE (Semantic Propositional Image Caption Evaluation) [4]. SPICE в основном используется для оценки качества автоматически сгенерированной разметки к изображению. Основным принципом работы этого подхода заключается в вычислении подобия между автоматически сгенерированной разметкой к изображению (candidate caption) и разметкой к изображению, помеченной экспертом вручную (reference caption). Главная особенность SPICE – использование семантического контента для вычисления подобия [4, 7].

Подходы, рассмотренные выше, имеют много недостатков при вычислении подобия между семантическими графами:

- инструменты, используемые для моделирования семантических графов в подходе SPICE (хотя он может вычислять подобие между семантическими графами), поддерживают только описание простых семантических отношений;
- невозможно судить о логической эквивалентности семантических графов. Логическая эквивалентность семантических графов означает, что одна и та же информация может быть описана разными системами понятий (разными по структуре семантическими графами), в этом случае информационные конструкции будут логически эквивалентными, но не семантически (например, определение симметричной разности может быть выражено в двух формах  $C = (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$  и  $C = A \Delta B$ ).

Поэтому на основе подхода SPICE предлагается подход к вычислению подобия между любыми двумя семантическими графами с использованием технологии OSTIS. Когда два семантических графа не полностью совпадают (подобие менее 1), можно судить, эквивалентны ли они логически. Проверить ответы на объективные вопросы об их правильности и полноте можно, комбинируя подобие между ответами и стратегией оценки текущего вопроса.

## Предлагаемый подход

На основе технологии OSTIS, используемой для разработки систем семантического интеллекта и соответствующих платформ, инструментов и подходов, предлагается подход к разработке решателя задач для автоматической проверки ответов на объективные вопросы. Каждая OSTIS-система состоит из не зависящей от платформы унифицированной логико-семантической модели этой системы (sc-модели компьютерной системы) и платформы интерпретации таких моделей. В свою очередь, каждая sc-модель компьютерной системы может быть декомпозирована на sc-модель базы знаний, sc-модель решателя задач, sc-модель интерфейса и абстрактную sc-память, в которой хранятся конструкции SC-кода. В качестве основы представления знаний в рамках технологии OSTIS используется унифицированный вариант кодирования информации любого рода на базе семантических сетей, названный SC-кодом [2, 3, 5]. Использование моделей, прикладных инструментов и подходов, предоставляемых технологией OSTIS, обеспечит следующие возможности:

- разработанный решатель задач может быть легко перенесен в OSTIS-системы, ориентированные на различные области;
- проверку правильности и полноты ответов пользователя на семантическом уровне.

Проверка ответов не зависит от естественного языка (английский, русский, китайский и т. д.). Когда ответы пользователя на естественном языке преобразуются в SC-код, они уже согласованы с существующими знаниями в базе знаний, т. е. sc-узлы, представляющие одно и то же понятие на семантическом уровне, имеют один и тот же основной идентификатор в базе знаний. Процесс выравнивания сущностей заключается в:

1) преобразовании текста на естественном языке в SC-код с использованием естественно-языкового интерфейса. В [6] подробно представлен подход к разработке естественно-языкового интерфейса по китайскому языку;

2) интеграции различных sc-узлов, представляющих одно и то же семантическое содержание в базе знаний, в один и тот же sc-узел и удаление избыточных sc-коннекторов (sc-дуг и sc-ребер). В [8] представлена автоматическая процедура интеграции знаний для OSTIS-систем, включая выравнивание сущностей.

### Разработка решателя задач

В OSTIS-системах решатели задач построены на основе мультиагентного подхода, т. е. решатель задач реализован в виде набора агентов, называемых sc-агентами. Все sc-агенты взаимодействуют через общую память [3] (IMS.OSTIS metasystem [Electronic Resource]. Access mode: <https://ims.ostis.net>. Access date: 24.10.2022). В соответствии с требованиями разработанный решатель должен выполнять следующие задачи:

- осуществлять вычисление подобия между любыми двумя семантическими графами; если два семантических графа не совпадают, необходимо узнать, эквивалентны ли они логически;
- проверять не только ответ на объективный вопрос с единственным правильным вариантом, но и ответ на объективный вопрос с несколькими правильными вариантами (вопрос на выбор с несколькими вариантами и частично вопрос на заполнение пробелов).

Решатель задач любой OSTIS-системы представляет собой иерархическую систему sc-агентов обработки знаний в семантической памяти. Для решения перечисленных выше задач разработаны некоторые sc-агенты, которые показаны в SCn-коде (одном из языков внешнего отображения SC-кода) следующим образом:

#### Решатель задач для автоматической проверки ответов на объективные вопросы

← *декомпозиция абстрактного sc-агента\**:

- ```
{  
• sc-агент для вычисления подобия семантических графов  
• sc-агент для оценки эквивалентности семантических графов  
• sc-агент для обработки результатов вычисления подобия семантических графов  
}
```

При проверке ответов на объективные вопросы последовательность инициирования sc-агентов выглядит следующим образом:

1) если решатель задач считает, что текущий вопрос является объективным, иницируется sc-агент для вычисления подобия семантических графов, чтобы начать вычислять подобие между семантическим графом стандартного ответа и семантическим графом ответа пользователя;

2) если подобие, вычисленное на первом шаге, не равно 1, решатель задач иницирует sc-агент для оценки эквивалентности семантических графов, этот sc-агент выполняет некоторую обработку семантических графов в соответствии с логическими эквивалентными шаблонами (не все семантические графы имеют соответствующие логические эквивалентные шаблоны), хранящиеся в базе знаний, а затем снова вычисляет подобие между ними;

3) когда подобие между семантическими графами получено, решатель задач автоматически иницирует sc-агент для обработки результатов вычисления подобия семантических графов. Окончательный результат проверки ответа выдается этим sc-агентом в соответствии с типом и характеристиками вопроса, с подобием между ответами.

Следует подчеркнуть, что проверка ответов является лишь одним из основных применений решателя задач. Решатель задач также позволяет вычислять подобие между произвольными семантическими фрагментами, построенными с использованием SC-кода, путем инициирования соответствующих sc-агентов. Структура семантических графов, используемая для описания ответов на объективные вопросы в OSTIS-системах, относительно проста, поэтому sc-агент для оценки эквивалентности семантических графов обычно полностью выполнен не будет (поскольку логического эквивалентного шаблона не существует).

#### Sc-агент для вычисления подобия семантических графов

Основная функция sc-агента для вычисления подобия семантических графов заключается в вычислении подобия между любыми двумя семантическими графами, описанными SC-кодом

(например, семантический граф стандартного ответа и семантический граф ответа пользователя). Подобие между ответами является основой для проверки ответов на объективные вопросы. Когда ответы пользователей на естественном языке преобразуются в SC-код, они уже согласуются с существующими знаниями в базе знаний (например, разрешение кореференции и т. д.) [6]. Поэтому в статье подобие между семантическими графами вычисляется на основе семантики и структур представления знаний.

Основной принцип работы sc-агента для вычисления подобия семантических графов заключается в следующем:

– в соответствии с правилами представления знаний стандартные ответы и ответы пользователей в виде семантических графов разделяются на подструктуры;

– в использовании формул для вычисления точности, полноты и подобия между семантическими графами:

$$P_{sc}(u, s) = \frac{|T_{sc}(u) \otimes T_{sc}(s)|}{|T_{sc}(u)|}, \quad (1)$$

$$R_{sc}(u, s) = \frac{|T_{sc}(u) \otimes T_{sc}(s)|}{|T_{sc}(s)|}, \quad (2)$$

$$F_{sc}(u, s) = \frac{2P_{sc}(u, s)R_{sc}(u, s)}{P_{sc}(u, s) + R_{sc}(u, s)}, \quad (3)$$

где  $\otimes$  – бинарный оператор сопоставления;  $T_{sc}(s)$  – множество, все разложенные подструктуры стандартного ответа  $s$ ;  $T_{sc}(u)$  – множество, все разложенные подструктуры ответа пользователя  $u$ .

Алгоритмы работы этого sc-агента приведены далее.

#### **Алгоритм 1. Алгоритм работы sc-агента для вычисления подобия семантических графов**

**Ввод:** конкретный объективный вопрос и соответствующий семантический граф стандартного ответа, семантический граф ответа пользователя.

**Выход:** точность, полнота и подобие между ответами, а также sc-узел, используемый для записи состояния соответствия подструктур:

1) проверка того, существуют ли стандартный ответ и ответ пользователя одновременно, если существуют, то переходим к шагу 2, в противном случае – к шагу 7;

2) в соответствии с правилами представления знаний семантический граф стандартного ответа и ответа пользователя разбивается на подструктуры (различные типы sc-конструкций);

3) итеративно проходится каждая подструктура стандартного ответа и ответа пользователя, классифицируя их в соответствии с типом подструктуры (трехэлементная sc-конструкция, пятиэлементная sc-конструкция и т. д.) и подсчитывая их количество;

4) в соответствии с классификационным набором подструктур итеративно вычисляется количество совпадающих подструктур между ответами и одновременно записываются совпадающие подструктуры;

5) использование формул (1)–(3) для вычисления точности, полноты и подобия и генерации семантических фрагментов для записи результатов работы sc-агента;

6) удаление всех временных sc-элементов, созданных во время работы sc-агента;

7) выход из программы.

На рис. 1 приведен пример использования этого sc-агента для вычисления подобия между семантическими графами на SCg-коде (SCg-код – графический вариант внешнего визуального представления SC-кода) [3].

#### **Sc-агент для оценки эквивалентности семантических графов**

Основная функция sc-агента для оценки эквивалентности семантических графов состоит в том, чтобы судить, являются ли два семантических графа логически эквивалентными. Процесс работы sc-агента для оценки эквивалентности семантических графов, заключается в следующем:

1) если подобие, вычисленное sc-агентом для вычисления подобия семантических графов, меньше 1, инициируется sc-агент для оценки эквивалентности семантических графов;

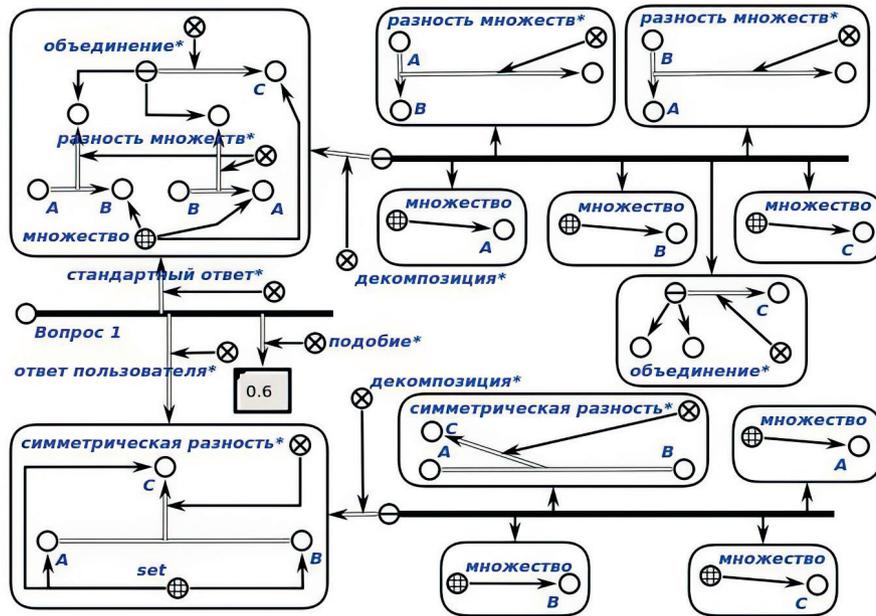


Рис. 1. Пример вычисления подобия между семантическими графами  
Fig. 1. An example of calculating similarity between semantic graphs

2) этот sc-агент найдет все sc-узлы в семантическом графе стандартного ответа и все sc-узлы в семантическом графе ответа пользователя соответственно. Затем проверяется, существует ли пара sc-узлов между sc-узлами стандартного ответа и sc-узлами ответа пользователя, и ее два sc-узла соответственно включены в шаблон, связанный с использованием отношения «эквиваленция\*». Если такая пара sc-узлов существует, то sc-агент продолжает выполнять следующий шаг, в противном случае sc-агент прекращает выполнение. На рис. 2 приведена пара шаблонов, удовлетворяющих логической эквивалентности на SCg-коде;

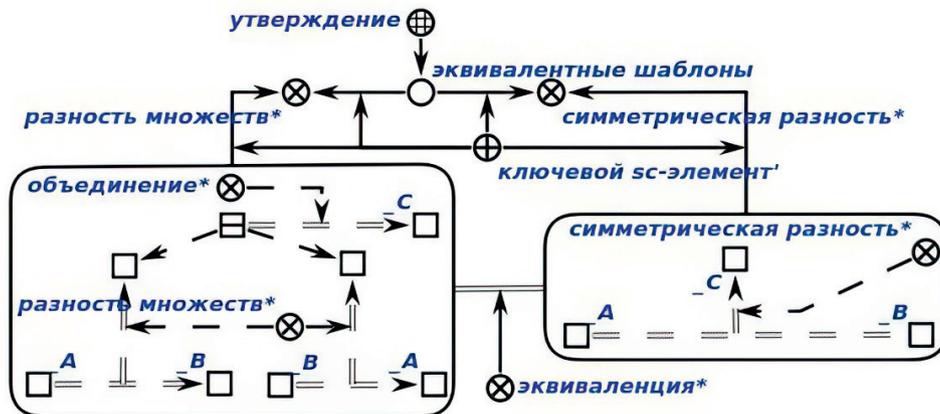


Рис. 2. Пара шаблонов, удовлетворяющих логической эквивалентности  
Fig. 2. A pair of templates satisfying logical equivalence

3) использование двух шаблонов, найденных на шаге 2, для поиска всех соответствующих семантических фрагментов в базе знаний и проверка наличия двух семантических фрагментов в этих найденных семантических фрагментах, которые соответственно включены в стандартный ответ и ответ пользователя. Если существуют такие два семантических фрагмента (соответствие различным шаблонам), то sc-агент продолжает выполнять следующий шаг, в противном случае sc-агент прекращает выполнение;

4) итеративно проходятся разложенные подструктуры стандартного ответа и разложенные подструктуры ответа пользователя, и каждая подструктура сравнивается с соответствующим

семантическим фрагментом, найденным на шаге 3. Если каждый sc-элемент в подструктуре содержится в соответствующем семантическом фрагменте, подструктура удаляется;

5) использование формул (1)–(3) для вычисления подобия между семантическими графами в соответствии с остальными подструктурами. Если подобие равно 1, то два семантических графа полностью совпадают.

Подобие между семантическими графами на рис. 1, пересчитанное с помощью этого sc-агента, равно 1, т. е. два семантических графа логически эквивалентны.

### Sc-агент для обработки результатов вычисления подобия семантических графов

Поскольку некоторые объективные вопросы имеют несколько правильных вариантов, необходимо всесторонне рассмотреть точность, полноту и подобие, чтобы полностью оценить правильность вопроса. Таким образом, функция sc-агента для обработки результатов вычисления подобия семантических графов состоит в том, чтобы дополнительно оценить правильность и полноту текущего вопроса на основе трех параметров измерения информатики, рассчитанных на предыдущем шаге, и стратегии оценки правильности объективных вопросов [5]. Стратегия оценки правильности и полноты объективных вопросов в основном заключается в следующем:

– если текущий вопрос имеет единственно правильный вариант (вопрос на выбор с одним правильным вариантом, вопрос суждения и частичный вопрос на заполнение пробелов), то только стандартный ответ и ответ пользователя точно совпадают, т. е. если подобие равно 1, вопрос считается правильным, в противном случае вопрос неверен;

– если текущий вопрос имеет несколько правильных вариантов (вопрос на выбор с несколькими правильными вариантами и частичный вопрос на заполнение пробелов), его можно разделить на следующие ситуации для суждения:

- пока ответ пользователя содержит неправильный вариант, вопрос считается неправильным; в таком случае подобие и точность менее 1;

- все варианты, включенные в ответ пользователя, являются правильными, но количество правильных вариантов меньше, чем количество правильных вариантов в стандартном ответе, тогда вопрос считается частично правильным и неполным; в этом случае точность равна 1, подобие – менее 1;

- если варианты в стандартном ответе точно соответствуют вариантам в ответе пользователя, вопрос полностью правильный и полный; тогда подобие равно 1.

Далее мы подробно представим алгоритм работы этого sc-агента.

### Алгоритм 2. Алгоритм работы sc-агента для обработки результатов вычисления подобия семантических графов

**Ввод:** семантические графы конкретного объективного вопроса, а также точность, полнота и подобие между ответами.

**Выход:** окончательный результат проверки ответа конкретного объективного вопроса и необходимые семантические фрагменты, используемые для отображения результата проверки ответа:

1) проверка соответствия всех входных параметров, используемых для работы sc-агента, условиям: если да, переходим к шагу 2, в противном случае – к шагу 5;

2) в соответствии со стратегиями оценки правильности и полноты объективных вопросов в сочетании с точностью, полнотой и подобием ответов проверить правильность и полноту конкретного объективного вопроса;

3) генерация семантических фрагментов, используемых для записи результатов выполнения sc-агента;

4) удаление всех временных sc-элементов, созданных во время работы sc-агента;

5) выход из программы.

Объединение трех sc-агентов, представленных выше, позволяет проверить правильность и полноту ответов пользователей на любые объективные вопросы. На рис. 3 показан пример использования решателя задач для автоматической проверки правильности и полноты ответов на вопрос на выбор на SCg-коде.

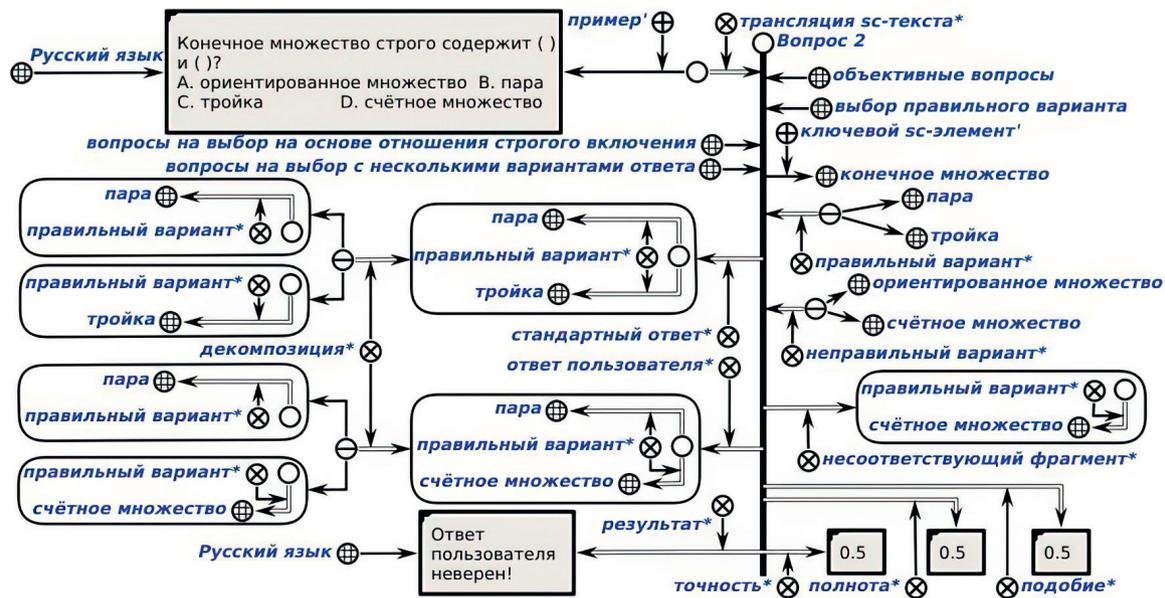


Рис. 3. Пример автоматической проверки ответов на вопрос на выбор  
Fig. 3. An example of automatic verification of answers to a multiple-choice question

## Заключение

Представлен подход к разработке решателя задач для автоматической проверки ответов на объективные вопросы в интеллектуальных обучающих системах, разработанных с использованием технологии OSTIS. Поскольку решатель задач разработан на основе мультиагентной технологии, он состоит из соответствующего набора sc-агентов: для вычисления подобия семантических графов, для оценки эквивалентности семантических графов и обработки результатов вычисления подобия семантических графов. Предлагаемый решатель задач использует различные комбинации sc-агентов для проверки ответов на объективные вопросы.

## Список литературы

1. Xu, G. P. Research on Intelligent Tutoring System / G. P. Xu, W. H. Zeng, C. L. Huang // Application Research of Computers. 2009. Vol. 26, No 11. P. 4020–4030.
2. Li, W. Ontological Approach for Question Generation and Knowledge Control / W. Li, N. Grakova, L. Qian // Communications in Computer and Information Science. 2020. Vol. 1282. P. 161–175.
3. Голенков, В. В. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. Ч. 1. Принципы создания / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // Онтология проектирования. 2014. № 4. С. 42–64.
4. SPICE: Semantic Propositional Image Caption Evaluation / P. Anderson [et al.] // Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV). 2016. Vol. 9909. P. 382–398. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.08822>.
5. Li, W. Development of a Problem Solver for Automatic Answer Verification in the Intelligent Tutoring Systems / W. Li, L. Qian // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2021). Minsk, 2021. P. 169–178.
6. Qian, L. Ontological Approach for Chinese Language Interface Design / L. Qian, M. Sadowski, W. Li // Open Semantic Technologies for Intelligent System: 10<sup>th</sup> International Conference OSTIS 2020, Minsk, 19–22 Feb. 2015 / Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; eds.: V. Golenkov [et al.]. Minsk: BSUIR, 2015. P. 146–160. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9_9).
7. Li, X. J. Realization of Automatic Scoring Algorithm for Subjective Questions Based on Artificial Intelligence / X. J. Li // Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition). 2009. Vol. 8. P. 292–295. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9_9).
8. Ивашенко, В. П. Модели и алгоритмы интеграции знаний на основе однородных семантических сетей / В. П. Ивашенко // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS–2015). Минск: БГУИР, 2015. С. 111–132.

## References

1. Xu G. P., Zeng W. H., Huang C. L. (2009) Research on Intelligent Tutoring System. *Application Research of Computers*. 26 (11), 4020–4030.
2. Li W., Grakova N., Qian L. (2020) Ontological Approach for Question Generation and Knowledge Control. *Communications in Computer and Information Science*. 1282, 161–175.
3. Golenkov V. V., Guliakina N. A. (2014) Project of Open Semantic Technology of the Componental Design of Intelligent Systems. Part 1. The Principles of Creation. *Ontology Designing*. (4), 42–64 (in Russian).
4. Anderson P., Fernando B., Johnson M., Gould S. (2016) SPICE: Semantic Propositional Image Caption Evaluation. *Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV)*. 9909, 382–398. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1607.08822>.
5. Li W., Qian L. (2021) Development of a Problem Solver for Automatic Answer Verification in the Intelligent Tutoring Systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2021)*. Minsk. 169–178.
6. Qian L., Sadouski M., Li W. (2020) Ontological Approach for Chinese Language Interface Design. *Open Semantic Technologies for Intelligent System: 10<sup>th</sup> International Conference OSTIS–2020, Minsk, 19–22 Feb. 2020, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 146–160. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9_9).
7. Li X. J. (2009) Realization of Automatic Scoring Algorithm for Subjective Questions Based on Artificial Intelligence. *Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition)*. 8, 292–295. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-03060447-9_9).
8. Ivashenko V. P. (2015) Models and Algorithms of Integration of Knowledge Based on Homogeneous Semantic Networks. *Otkrytye Semanticheskie Tekhnologii Proektirovaniya Intellektual'nyh Sistem = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2015)*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 111–132 (in Russian).

## Сведения об авторе

**Вэньцзу Ли**, аспирант кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 29 851-60-84  
E-mail: lwzzggml@gmail.com  
Вэньцзу Ли

## Information about the author

**Wenzu Li**, Postgraduate at the Department of Intelligent Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 29 851-60-84  
E-mail: lwzzggml@gmail.com  
Wenzu Li



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-57-63>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 004.912

## ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРИОБРЕТЕНИЮ ЗНАНИЙ ИЗ ТЕКСТОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

ЛУНВЭЙ ЦЯНЬ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 27.10.2022*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** Главная задача приобретения знаний (также называемая извлечением знаний) из текстов естественного языка – это извлечение знаний из текстов естественного языка в фрагмент базы знаний интеллектуальной системы. С учетом ознакомления с соответствующей литературой о приобретении знаний в стране и за рубежом в статье анализируются преимущества и недостатки классического подхода к извлечению знаний. После тщательного исследования технологии извлечения знаний на основе правил и методов построения онтологий лингвистики предложено решение для реализации извлечения знаний на основе технологии OSTIS. Основной особенностью этого решения является построение единой семантической модели, которая может использовать онтологии лингвистики (в основном синтаксический и семантический аспекты) и интегрировать различные модели решения задач (например, модели на основе правил, модели нейронных сетей) для решения извлечения знаний из текстов естественного языка.

**Ключевые слова:** онтология, база знаний, обработка естественного языка, извлечение знаний, интеллектуальная система.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Лунвэй Цянь. Онтологический подход к приобретению знаний из текстов естественного языка / Лунвэй Цянь // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 57–63. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-57-63>.

## ONTOLOGY-BASED KNOWLEDGE ACQUISITION METHOD FOR NATURAL LANGUAGE TEXTS

LONGWEI QIAN

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27.10.2022*

**Abstract.** The main task of knowledge acquisition (also named knowledge extraction) from natural language texts is to extract knowledge from natural language texts into fragment of knowledge base of intelligent system. Through the induction of the related literature about knowledge acquisition at a home country and abroad, this paper analyses the strengths and weaknesses of the classical approach. After emphatically researching the rule-based knowledge extraction technology and the method of building ontology of linguistics, this article proposes a solution to the implementation of knowledge acquisition based on the OSTIS technology. The main feature of this solution is to construct a unified semantic model that is able to utilize ontologies of linguistics (mainly, syntactic and semantic aspect) and integrate various problem-solving models (e. g., rule-based models, neural network models) for solving knowledge extraction process from natural language texts.

**Keywords:** ontology, knowledge base, natural language processing, knowledge extraction, intelligent system.

**Conflict of interests.** The author declares no conflict of interests.

**For citation.** Longwei Qian (2023) Ontology-Based Knowledge Acquisition Method for Natural Language Texts. *Digital Transformation*. 29 (1), 57–63. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-57-63> (in Russian).

## Введение

В настоящее время приложения интеллектуальных систем, основанные на фактологических знаниях, начали служить людям в разных сферах их жизнедеятельности. Одна из технических трудностей при разработке этого типа приложений заключается в необходимости извлечения структурированных фактологических знаний для построения цифровых баз знаний в интеллектуальных системах. Текст естественного языка – наиболее распространенная форма неструктурированных данных. Использование автоматизированных подходов для обнаружения и извлечения фактологических знаний из неструктурированных данных для различных интеллектуальных систем становится все более актуальной задачей. Цель исследований автора – построение единой семантической модели на основе технологии OSTIS [1] к извлечению фактологических знаний (сущностей и отношений между ними) из разных текстов естественного языка. По сравнению с системами извлечения знаний из закрытых областей, в которых нужно определить конкретные типы для извлечения фактологических знаний, предлагаемый подход предоставляет возможность извлечения фактологических знаний из открытой области без заранее определенных конкретных типов.

## Сопутствующие работы

Задачу извлечения фактологических знаний из неструктурированного текста разделяют на два направления: извлечение знаний из закрытых и открытых областей. Данная задача заключается в получении структурированных данных, которые затем выражаются в некоторой форме представления знаний. Таким образом, основная цель этого процесса – извлечение именованных сущностей и отношений между ними из текстов естественного языка, причем извлеченные результаты сохраняются в форме внутреннего языка представления знаний интеллектуальной системы, например, в RDF, SC-коде [1] и др. С точки зрения SC-кода отношения рассматриваются как особая сущность, которая извлекается из текстов естественного языка и представляется в базе знаний интеллектуальной системы.

Для извлечения фактологических знаний из закрытых областей часто нужны заранее определенные типы именованных сущностей и отношений между ними. В данных системах извлечение фактологических знаний с использованием машинного обучения или модели нейронных сетей всегда требует очень мощного оборудования. Однако цель извлечения фактологических знаний из открытой области состоит в том, чтобы извлекать различные наборы отношений между именованными сущностями из массивных и разнородных текстов естественного языка без требований заранее заданного словаря для определения типа данных отношений.

Извлечение фактологических знаний из открытых областей напрямую определяет относительное словосочетание в тексте, анализируя текст естественного языка (в частности, предложение), чтобы реализовать моделирование классификации именованных сущностей и отношений между ними без необходимости заранее определять категории отношений. Системы ReVerb [2] и OLLIE [3] используют общий синтаксис и лексические ограничения для извлечения фактологических знаний для английских предложений из открытых областей. Однако из-за разнообразия и сложности языков способ сегментации слов и реализация грамматических функций заметно различаются (например, в английском и китайском).

Согласно письменной особенности текстов китайского языка, в предложении иероглифы пишутся один за другим, между ними не существуют естественные пробелы. Синтаксическая структура и категория частей речи для обработки английского языка не полностью применимы к обработке китайского текста. Авторы [4] предложили классическую архитектуру CORE для извлечения именованных сущностей и отношений между ними из открытой области для китайских предложений.

Несмотря на то что большое количество систем извлечения фактологических знаний реализовано и успешно применяется на практике, остаются проблемы, которые не решились ни в одном

из перечисленных методов. При решении однотипной задачи извлечения знаний накладные расходы увеличиваются из-за модификации модели и добавления в систему новых моделей. В существующих системах отсутствует единая основа для представления любых видов знаний в единой базе знаний, используемых для анализа текстов естественного языка, в том числе синтаксических и семантических знаний, а также правил для их извлечения. Таким образом, синтаксические, семантические знания и правила извлечения необходимо многократно разрабатывать в разных системах, что значительно усложняет создание прикладной системы и соответственно накладные расходы.

### **Онтологический подход**

Рассматривается онтологический подход, основанный на технологии OSTIS, для извлечения фактологических знаний (в основном именованные сущности и отношения между ними из открытой области для текстов естественного языка). Он устраняет ограничения ранее принятых онтологических подходов, которые применялись только для извлечения знаний из закрытых областей. Предлагаемый автором подход ориентирован на извлечение фактологических знаний из открытых областей, он выполняет синтаксически-семантический анализ текстов естественного языка с помощью построения онтологии лингвистики, а затем напрямую извлекает фрагменты базы знаний (фактологические знания в виде SC-кода), построенной в логической онтологии. Также обеспечивает единую унифицированную основу для объединения синтаксических и семантических знаний, логических правил для анализа текстов естественного языка и извлечения фактологических знаний в единую базу знаний лингвистики.

Технология OSTIS направлена на разработку класса систем, которые названы управляемыми знаниями компьютерными системами (OSTIS-системами). Компонент, реализующий извлечение знаний из текста естественного языка, обычно разрабатывается как часть естественно-языкового интерфейса OSTIS-системы. OSTIS-система – это интеллектуальная система, основанная на знаниях, состоящая из базы знаний, представленной на внутреннем языке SC-кода, и решателей задач, объединяющих все программные агенты для решения конкретных проблем. SC-код является формой языка семантической сети с базовой теоретико-множественной интерпретацией. Элементы таких семантических сетей называются sc-элементами (sc-узлами и sc-коннекторами, которые, в свою очередь, могут быть sc-дугами или sc-ребрами, в зависимости от направленности). Для внешнего представления абстрактных sc-текстов используются несколько внешних форм отображения, таких как SCg-код, SCn-код, SCs-код.

На основе анализа структуры базы знаний OSTIS-систем, представленной в SC-коде, можно определить цель извлечения знаний. Чтобы преобразовать тексты естественного языка в sc-структуру, необходимо описать синтаксические и семантические знания конкретного естественного языка для анализа текста, а также построение правил извлечения. Более того, в технологии OSTIS база знаний построена как иерархическая система предметных областей и соответствующих онтологий [5]. Каждая онтология представляет собой спецификацию системы понятий, используемых в соответствующей предметной области. В каждой предметной области описаны различные отличительные онтологии, отражающие определенный набор особенностей понятий в предметной области, например, терминологическая онтология, логическая онтология, теоретико-множественная онтология и т. д. Ниже приводится общая иерархия предметной области лингвистики на SCn-коде.

### **Предметная область лингвистики**

⇒ Частная ПО\*:

- Предметная область текстов китайского языка
- Предметная область текстов английского языка
- Предметная область текстов русского языка

Из приведенной общей структуры видно, что для реализации анализа текстов конкретного естественного языка необходимо построить предметную область текстов конкретного естественного языка. В качестве примера используем анализ текста китайского языка. Приведем построенную предметную область текстов китайского языка (более подробное ее объяснение дано в [6]).

## Предметная область текстов китайского языка

⇒ Частная ПО\*:

- Раздел. Предметная область лексического анализа
- Раздел. Предметная область синтаксического анализа
- Раздел. Предметная область семантического анализа

Все три раздела описывают спецификацию системы понятий, логических правил (например, правил извлечения) и других знаний с лексического, синтаксического и семантического аспектов китайского языка соответственно. На рис. 1 на SCg-коде указано простое правило извлечения, используемое для извлечения sc-конструкции, которое представлено логическим утверждением в логической онтологии.

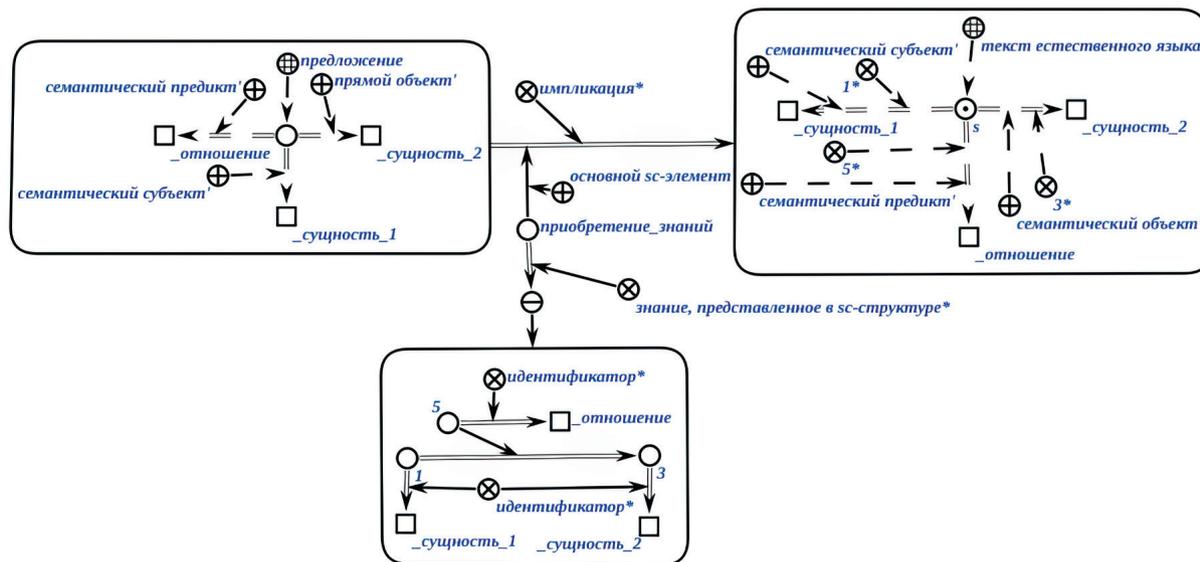


Рис. 1. Логическое утверждение о правиле извлечения в логической онтологии

Fig. 1. Logical statement about extraction rule in the logical ontologies

Используя лингвистические знания в базе знаний лингвистики для реализации автоматического извлечения sc-структур из текстов естественного языка на основе ряда технологий обработки текста, т. е. лексического, синтаксического, семантического анализа и правил извлечения, необходимо разработать решатель задач. В рамках технологии OSTIS решатель задач интерпретируется как иерархическая система агентов (sc-агентов) [7]. Многоагентный подход предоставляет возможность комбинировать разные модели решения задач при выполнении одной и той же сложной задачи, а также добавлять новые их модели в решатель. Агенты могут реализовывать как логические рассуждения на основе иерархии утверждений, так и алгоритмы обучения на основе данных с использованием различных языков программирования. В соответствии с классической архитектурой далее приведена общая структура решателя задач на SCn-коде для перевода текстов внешнего языка во фрагменты базы знаний.

### Абстрактный sc-агент трансляции внешних текстов в фрагменты базы знаний

≤ Декомпозиция абстрактного sc-агента\*:

- ```
{
• Абстрактный sc-агент лексического анализа
• Абстрактный sc-агент синтаксического анализа
• Абстрактный sc-агент семантического анализа
• Абстрактный sc-агент генерации sc-структур
}
```

Абстрактные sc-агенты лексического анализа – группы агентов, реализующие механизмы декомпозиции входных внешних текстов на лексические единицы. Компоненты внешних текстов могут быть определены. Абстрактные sc-агенты синтаксического и семантического анализа –

агенты, реализующие механизмы построения синтаксической и семантической структур внешних текстов. Абстрактные sc-агенты генерации sc-структур – агенты, реализующие механизмы интеграции семантического эквивалента sc-текста в базу знаний конкретной OSTIS-системы.

### Реализация извлечения фактологических знаний для китайского языка

Общий процесс извлечения структурированных фактологических знаний из разных текстов естественного языка аналогичен. С точки зрения технологии OSTIS любой текст из внешнего ввода в OSTIS-систему представляется в виде файла (то есть sc-узла с содержимым). На рис. 2 приведен пример такого узла, в котором указан конкретный фрагмент текста китайского языка, описывающий конечное множество, тройку и ориентированное множество.



Рис. 2. Представление текста китайского языка в OSTIS-системе  
Fig. 2. Representation of Chinese language text in the OSTIS-system

С помощью ранее построенных онтологий лингвистики и решателей задач в OSTIS-системе рассмотрим обработку указанного на рис. 2 фрагмента текста естественного языка, чтобы проиллюстрировать каждый из этапов извлечения знаний из этого текста. Без какого-либо определенного словаря этот текст китайского языка рассматривается как единственный ввод в OSTIS-систему, а его вывод представляет собой извлеченные sc-структуры. Для большинства задач обработки китайского языка основным предварительным этапом является автоматическая сегментация слов в текстах. Для обработки китайского языка был предложен Стандарт сегментации слов современного китайского языка, используемый для обработки информации, в котором слово представлено единицей сегментации. Отличительная черта китайского языка – у китайского слова есть только одна форма и нет никаких изменяемых форм, таких как единственное и множественное число, временная форма, падежи. Извлечение знаний из текста китайского языка представлено следующими этапами.

Этап 1. Лексический анализ текста китайского языка раскладывает предложение, приведенное на рис. 2, на отдельные лексические единицы сегментаций.

Этап 2. Синтаксический анализ выполняет переход от данных отдельных единиц сегментаций текста к его синтаксической структуре, которая переносится в sc-конструкцию (рис. 3).

В приведенном на рис. 3 фрагменте видно, что между текстом китайского языка и отдельными лексическими единицами возникают отношения, характеризующие его синтаксические отношения в предложении. Отношения описываются как онтологии в соответствующей предметной области.

Этап 3. Семантический анализ выполняет анализ семантических взаимоотношений в тексте и переход от обработанного текста к sc-конструкции с помощью соответствующей предметной области (рис. 4). Представленный на рис. 4 фрагмент базы знаний включает в себя семантическую структуру данного текста, установленную отношениями зависимости.

Этап 4. Генерация sc-структур извлекает семантический эквивалент sc-текста в фрагмент базы знаний конкретной OSTIS-системы на основе предыдущего анализа текста и правил извлечения, описанных в соответствующей предметной области. Конечная извлеченная sc-конструкция представлена на рис. 5.

Согласно построенному на рис. 5 правилу извлечения, семантическое подлежащее и прямое дополнение текста извлекаются как именованные сущности в базе знаний. В семантической структуре существует отношение «согласованные аргументы» между тремя прямыми дополнениями, которые извлекаются вместе как именованные сущности. Семантическое сказуемое текста служит отношением между этими именованными сущностями. Процесс также включает связывание для sc-элементов и устранение противоречий.

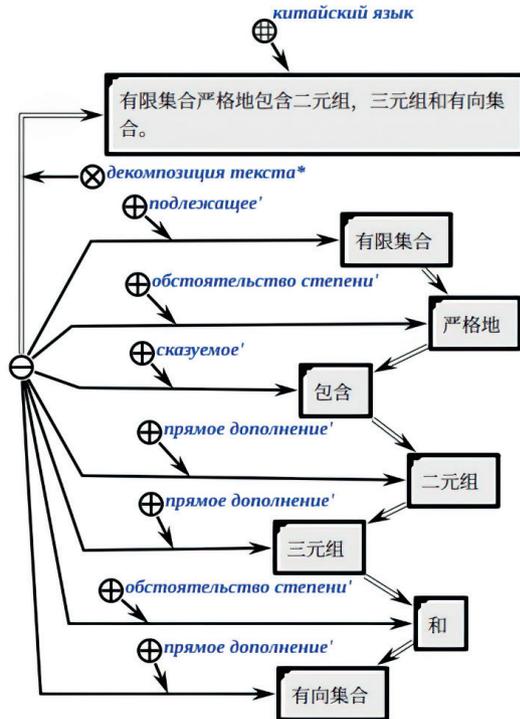


Рис. 3. Результат синтаксического анализа текста китайского языка  
Fig. 3. The result of syntactic analysis of Chinese language text

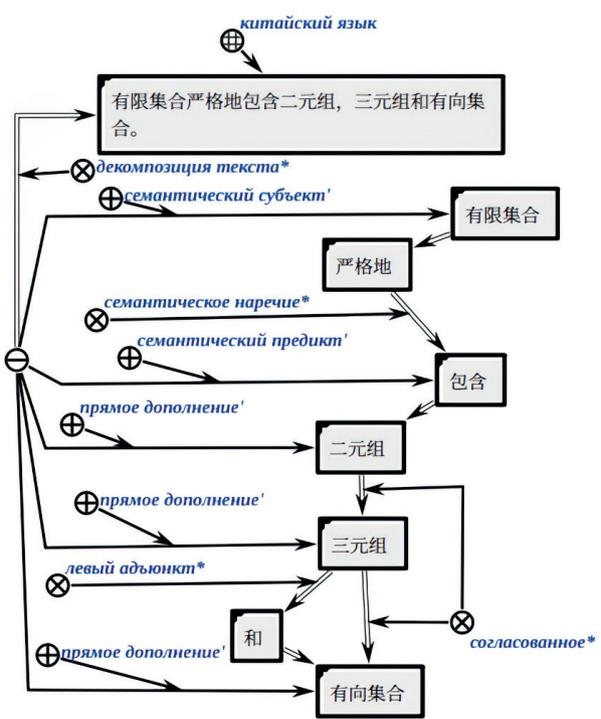


Рис. 4. Результат семантического анализа текста китайского языка  
Fig. 4. The result of semantic analysis of Chinese language text

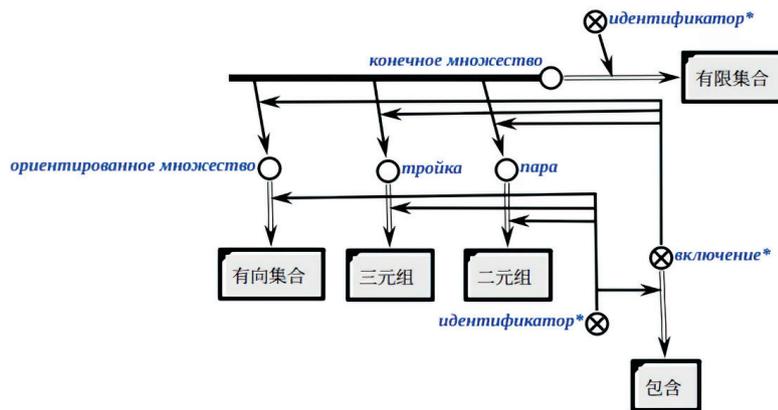


Рис. 5. Извлеченная sc-структура в базе знаний  
Fig. 5. The extracted sc-structure in the knowledge base

### Заклучение

На основе предложенной единой семантической модели может реализоваться автоматическое извлечение фактологических знаний в виде SC-кода (именованные сущности и отношения между ними) без какого-либо ручного вмешательства (т. е. заранее определенные конкретные типы именованных сущностей и отношений) посредством синтаксически-семантического анализа текстов и логических правил из области лингвистики. Модель, построенная на основе технологии OSTIS, реализует унифицированное управление онтологией лингвистики, правилами извлечения фактологических знаний и решателями задач, эффективно сокращает сложность и временные затраты на разработку системы извлечения фактологических знаний.

### Список литературы

1. Голенков, В. В. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. Ч. 1. Принципы создания / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // *Онтология проектирования*. 2014. № 4. С. 42–64.
2. Fader, A. Identifying Relations for Open Information Extraction / A. Fader, S. Soderland, O. Etzioni // *In Proceedings of the 2011 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Association for Computational Linguistics, Edinburgh, Scotland, UK. 2011. P. 1535–1545.
3. Open Information Extraction: the Second Generation / O. Etzioni [et al.] // *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'11)*. Barcelona: AAAI Press, 2011. P. 3–10.
4. Tseng, Y. H. Chinese Open Relation Extraction for Knowledge Acquisition / Y. H. Tseng, L. H. Lee // *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*, Gothenburg, Sweden, April 26–30, 2014. P. 12–16.
5. Davydenko, I. T. Ontology-based Knowledge Base Design / I. T. Davydenko // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017): Materials of the International Scientific and Technical Conference*, Minsk, 16–18 Feb. 2017. Minsk: BSUIR, 2017. P. 57–72.
6. Цянь Лунвэй. Онтологический подход к обработке текстов китайского языка / Цянь Лунвэй // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 6. С. 49–56. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-49-56>.
7. Shunkevich, D. V. Ontology-based Design of Knowledge Processing Machines / D. V. Shunkevich // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017): Materials of the International Scientific and Technical Conference*, Minsk, 16–18 Feb. 2017. Minsk: BSUIR, 2017. С. 73–94.

### References

1. Golenkov V. V., Guliakina N. A. (2014) Project of Open Semantic Technology of the Componental Design of Intelligent Systems. Part 1. The Principles of Creation. *Ontology Designing*. (4), 42–64 (in Russian).
2. Fader A., Soderland S., Etzioni O. (2011) Identifying Relations for Open Information Extraction. *In Proceedings of the 2011 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Association for Computational Linguistics, Edinburgh, Scotland, UK. 1535–1545.
3. Etzioni O., Fader A., Christensen J., Soderland S., Mausam M. (2011) Open Information Extraction: the Second Generation. *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'11)*. Barcelona, AAAI Press. Publ. 3–10.
4. Tseng Y. H., Lee L. H. (2014) Chinese Open Relation Extraction for Knowledge Acquisition. *Proceedings of the 14<sup>th</sup> Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics*, Gothenburg, Sweden, April 26–30. 12–16.
5. Davydenko I. T. (2017) Ontology-Based Knowledge Base Design. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017): Materials of the International Scientific and Technical Conference*, Minsk, 16–18 Feb. 2017. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 57–72.
6. Qian Longwei (2020) Ontological Approach to Chinese Text Processing. *Doklady BGUIR*. 18 (6), 49–56. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-49-56> (in Russian).
7. Shunkevich D. V. (2017) Ontology-Based Design of Knowledge Processing Machines. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017): Materials of the International Scientific and Technical Conference*, Minsk, 16–18 Feb. 2017. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 73–94.

### Вклад автора / Author's contribution

Лунвэй Цянь осуществил постановку задачи для извлечения знаний из текстов естественного языка, предложил новый подход к решению задачи, подготовил рукопись статьи / Qian Longwei formulated the problem for extracting knowledge from natural language texts, proposed a new approach to solving the problem, and prepared the manuscript of the article.

### Сведения об авторе

Лунвэй Цянь, аспирант кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 29 721-60-63  
E-mail: qianlw1226@gmail.com  
Лунвэй Цянь

### Information about the author

Longwei Qian, Postgraduate at the Department of Intelligent Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 29 721-60-63  
E-mail: qianlw1226@gmail.com  
Longwei Qian



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-64-71>

*Original paper*

UDC 339.138

## SIMULATION OF IoT SMART HOME NETWORK WITH DECISION MAKING BASED ON MAJORDOMO PLATFORM

ULADZIMIR A. VISHNIAKOU, CHUYUE YU

*Belarusian State University of informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27.01.2023*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023

**Abstract.** The purpose of the article is to model a smart home with decision-making and the use of the MajorDoMo IoT platform instead of a cloud platform. The main features of the article are: modeling of the IoT network for controlling the control unit on the MajorDoMo platform, the use of the MajorDoMo IoT platform in the Windows system for making decisions when controlling household appliances (fan or air conditioner) based on the temperature and humidity values received from a smartphone modeling sensors, transmitting the results of controlled data to the user's home page. The structure of the MajorDoMo platform is given, its functions are described, and commands for decision support are considered. The use of product rules is proposed as a decision-making model. An example of such a description for data regulation by the household appliances is given. The user can log into the IoT network and view changes in temperature and humidity in real time, as well as check the regulation of the equipment. The possibilities of the PHP language for the implementation of the control process are presented, in which the household device begins to adjust the parameters when the environmental monitoring system detects that the corresponding data exceeds the set threshold

**Keywords:** IoT network, sensor simulation, smart home, decision-making, MajorDoMo platform, temperature, humidity.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Vishniakou U. A., ChuYue Yu (2023) Simulation of IoT Smart Home Network with Decision Making Based on MajorDoMo Platform. *Digital Transformation*. 29 (1), 64–71. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-64-71>.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ IoT «УМНЫЙ ДОМ» С ПРИНЯТИЕМ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАТФОРМЫ MAJORDOMO

В. А. ВИШНЯКОВ, ЧУЮЭ ЮЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 27.01.2023*

**Аннотация.** Смоделирована сеть умного дома с принятием решений и использованием локальной IoT-платформы MajorDoMo вместо облачной платформы. Основными задачами являлись: моделирование сети IoT для управления на платформе MajorDoMo, использование платформы MajorDoMo IoT в системе Windows, описание принятия решений при управлении бытовой техникой (вентилятором или кондиционером) на основе значений температуры и влажности, полученных от датчиков (смоделированных средствами смартфона), передача результатов контролируемых данных на домашнюю страницу пользователя. Приведена структура платформы MajorDoMo, описаны ее функции и рассмотрены команды для поддержки принятия решений. В качестве модели принятия решений предлагается использовать производственные пра-

вила. Приведен пример описания правил для регулирования данных бытовыми приборами. Пользователь может войти в сеть интернета вещей и просматривать изменения температуры и влажности в режиме реального времени, а также проверять регулировку оборудования. Представлены возможности языка PHP для реализации процесса управления, при котором бытовое устройство начинает корректировать параметры, когда система мониторинга окружающей среды обнаруживает, что соответствующие данные превышают установленный порог.

**Ключевые слова:** сеть интернета вещей, моделирование датчиков, умный дом, принятие решений, платформа MajorDoMo, температура, влажность.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Вишняков, В. А. Моделирование сети IoT «Умный дом» с принятием решений на основе платформы MajorDoMo / В. А. Вишняков, ЧуЮэ Юй // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 64–71. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-64-71>.

## Introduction

The smart home management system [1] uses the IoT platform as the basis for the implementation of the IoT network. It considers household appliances, home electronics, metering devices for resource consumption (water, electricity) as the main objects of management. It applies the following technologies: integrated wiring, network communication, security, automatic control, audio and video registration technology for effective control and management of residential premises. This network can receive different types of sensor signals from different sensor devices [2] and launch control commands or, possibly, extract control commands using human remote control or manually starting devices. If people are not indoors, they can also control all internal devices via the Internet at a distance [3]. In [4], the authors considered the process of modeling the IoT network. Alibaba IoT cloud platform has been selected as a cloud server for the IoT network project. Since it is not convenient to use cloud resources to manage small objects, consider using a local platform to manage a smart home. Taking the MajorDoMo platform as such an example, we will show how to implement the process of regulating the conditions in the house based on environmental data.

## Smart home control system

The smart home management system has five main functions: flexible system composition, convenient management [5], numerous control functions, sharing of information resources [6], ease of debugging and installation. In order to integrate resources and provide holistic smart home services, such as multitasking, intelligence and platforming, a corresponding industry is developing [7]. Intelligent automatic control of home devices is the main feature of the smart home platform. An ideal smart home automatic control system should have three main functions. Firstly, it can automatically manage the home environment without disturbing the user, and free the user from the tedious work of monitoring home devices (maintenance automation). Secondly, it can accurately predict and correct the working condition of smart devices at home and avoid improper handling of them, i. e. ensure (accuracy of maintenance). Thirdly, it can fully study user habits, understand their needs and optimize user experience, i. e. create a service environment [8]. The decision-making model proposed in this article is intended for the first function, that is, “service automation”.

## MajorDoMo platform

We used the MajorDoMo IoT platform to manage a smart home, because it has a large number of users and an experienced forum and community where we can find information from the moment of its launch. The platform is implemented with open source and is constantly supported by a lot of specialists and users, it is becoming more versatile and able to help us flexibly solve various problems we have encountered, simulate a real environment so that we do not have to create it offline [9].

In MajorDoMo, methods and properties are distributed according to the class of the object, that is, the object that basically introduces the concept, and the collection of objects is divided into different classes, each with its own properties and methods of interaction. MajorDoMo also supports the introduction of other subclasses that will have their new properties that can be set by inheritance. The original hardware form of the MajorDoMo object is a controller that can communicate between the controlled device or sensor and the central system in which the MajorDoMo software package is located. Its struc-

ture includes primitives of classes, properties, methods and objects, which are introduced with the help of specialized additions. For a specific user, this means that he does not need to understand the nuances of device exchange protocols, their internal properties or methods in each case. Fig. 1 shows the general structure of the system when the MajorDoMo collects data.

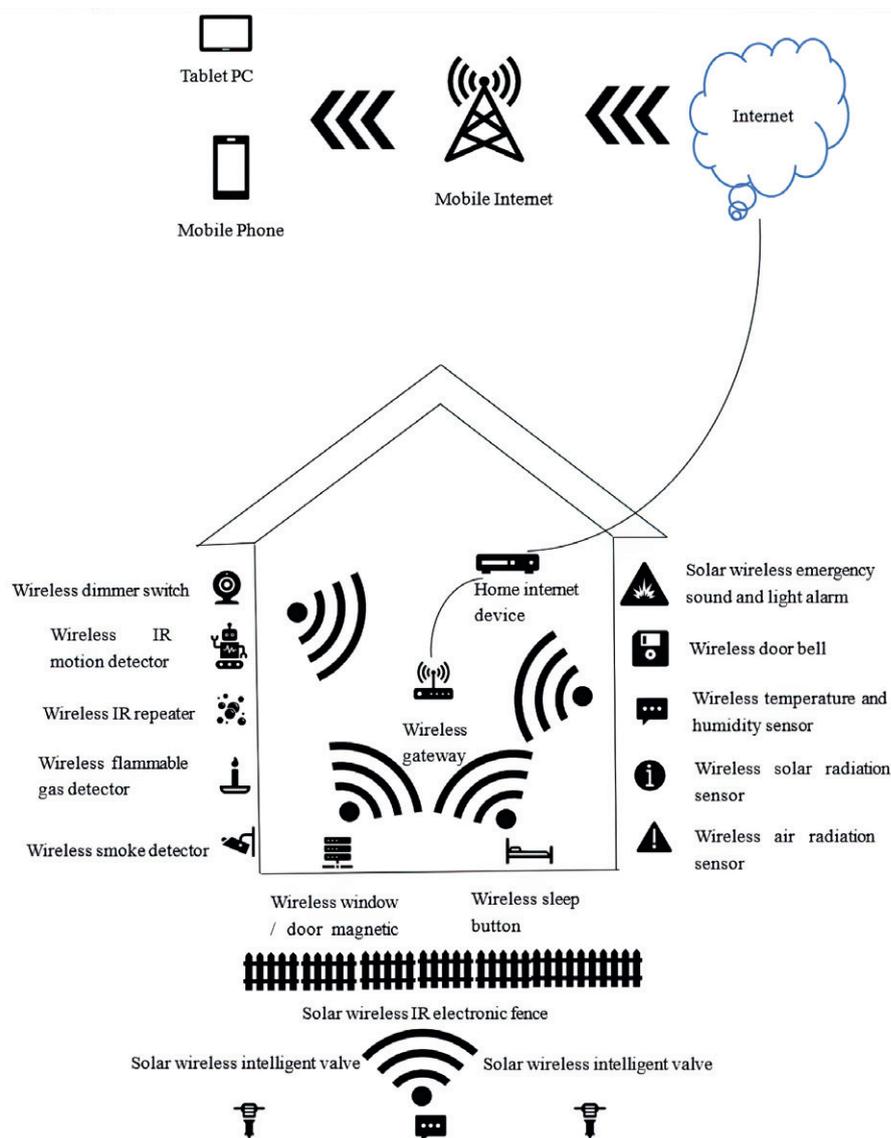


Fig. 1. The general structure of the system when MajorDoMo collects data

The main scripting language of MajorDoMo is the PHP programming language, which can be used to write scripts for the system's response to various events. In addition to the basic language structure, the environment has a library of native functions that can be used to automate any process. In addition to the built-in system functions, you can create your own custom functions.

Visual programming based on Google Blockly is integrated into this environment using a graphical representation, and when building algorithms, it is enough to combine them in the required order. MajorDoMo is designed with many functions, you can interactively set schedules, manage devices with or perform many other actions that will be performed thanks to the capabilities of the intelligent assistant. Fig. 2 shows some of the functions that majordomo can implement. Within the framework of the system, you can extract data from the network and use it in shell scripts.

One of the key features of MajorDoMo is that it supports many communication protocols and several switching protocols – MQTT, Z-Wave, Broadlink, etc. It also supports a large number of devices from different manufacturers and has a very wide range of adaptability. Communication between the components of the platform system is carried out via Wi-Fi, routers, Ethernet, etc., on the one hand, and interaction through transport protocols such as MQTT, etc.

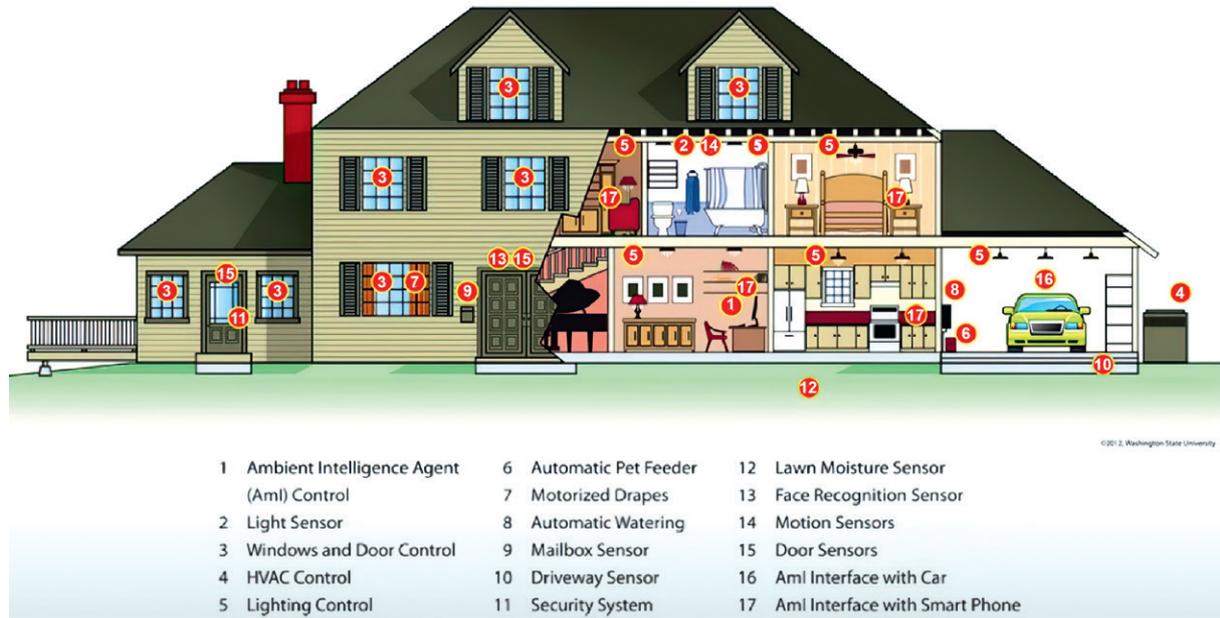


Fig. 2. Some of the features that MajorDoMo has

For most devices in a smart home, it is usually necessary not only to follow the instructions of the control part, but also to return their state. The platform uses a hybrid approach to task data management, i. e. the central server remains the largest data storage and collection point, as shown in Fig. 3.

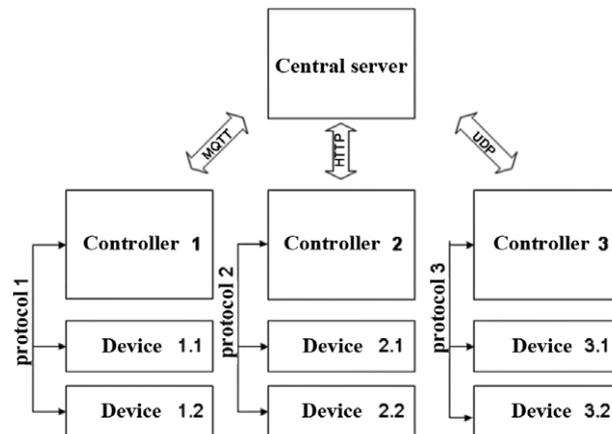


Fig. 3. Hybrid management of task data

In fact, the hardware components of the central computer itself are not important, the system is represented by a dedicated network shell operating in the server space of the home network, which can run under the operating system, Windows or Linux. Client devices can be represented by almost any device in production, from MQTT devices to Broadlink RF radio control. Being a full-fledged Internet of Things platform, MajorDoMo has four different components for implementing various interaction models, namely:

1. IoT devices collect various types of data (voice, video, images, or structured time series data such as vibration, heat, etc.) from the environment. Some IoT devices also interact with the environment rather than just collecting data.

2. Solutions for connecting to a global network that allow devices to transfer data to the cloud or receive commands from it.

3. Data processing software that performs analytics for devices. Based on the results of the analysis, they can make decisions based on the data.

4. Monitoring and management software that provides a user interface. The most common use of the user interface layer is remote device management and visualization of analytics results.

Real-time decision-making models in smart home control systems require the use of so-called peripheral computing on Internet of Things platforms, which is a technology that allows intelligent devices to send or receive data to and from the Internet of Things platform, as well as perform other operations.

As an example, here are some of the commands that can be executed on the platform in MajorDoMo, are:

*DebMes (\$errorMessage, \$logLevel)* – writes the message to the main log file. The *\$logLevel* parameter is optional and is set to debug by default;

*sayTo (Phrase, LEVEL, NAME)* – can use the system terminal name as the NAME and if it is a terminal on MajorDroid, it will be sent a command to say it;

*getHistoryMin (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns the minimum value for the period;

*getHistoryMax (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns the maximum value for the period;

*getHistoryCount (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns the number of values for the period;

*getHistorySum (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns the sum of values for the period;

*getHistoryAvg (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns the average of the period;

*getHistory (\$varname, \$start\_time, \$stop\_time)* – returns an array of history values.

### Real-time decision model of IoT smart home management

MajorDoMo is one of the smart home platforms, and the implementation of automatic control technology is based on the establishment of rules. Therefore, we set the rules for limiting the system in accordance with the target tasks and target objects. Assumed that the relationship between the object and the object was:

– when the humidity exceeds the threshold value, the fan turns on, otherwise it turns off. The initial value of the humidity threshold is 50 %;

– when the temperature exceeds the threshold value, the air conditioner turns on, otherwise it turns off. The initial value of the temperature threshold is 25 degrees;

– the user can remotely set the temperature and humidity threshold.

Let's choose a production model for decision-making: if A, then B [10]. Since there was no real humidity sensor and temperature sensor in the simulation to simulate the process of collecting data in real time, we defined the timer function so that the temperature value and humidity sensor were updated every minute. The value of the temperature sensor was “minutes of current time – hours of current time”, and the value of the humidity sensor was “minutes of current time + hours of current time”. The specific model in this case has the form:

TempSensor01.value = a

HumSensor01.value = b

Realttime.hour = h

Realttime.minute = m

Airconditioner1.status = {0,1}

Fan1.status = {0,1}

a = m – h

b = m + h

if a ≤ 25, then Airconditioner1.status = 0, else, Airconditioner1.status = 1.

if b ≤ 50, then Fan1.status = 0, else, Fan1.status = 1.

### Model implementation based on the MajorDoMo platform

To implement the smart home control function, so that smart home devices will turn on or off depending on changes in temperature and humidity, first create objects. There were several categories of parent objects in the MajorDoMo objects column: computer, bedroom, weather, operation, room, device, system status, timer. Since we needed a sensor device object, so the SDevices object class was selected, a humidity sensor and a temperature sensor object were found in its subclasses, and an instance of a humidity sensor was created, which is named HumSensor01, as shown in Fig. 4.

Similarly, an instance of a temperature sensor was created, the value TempSensor01 was set for this sensor. Then an instance of the air conditioner and fan is created. Inter-object connections have also been created and temperature and humidity thresholds have been set.

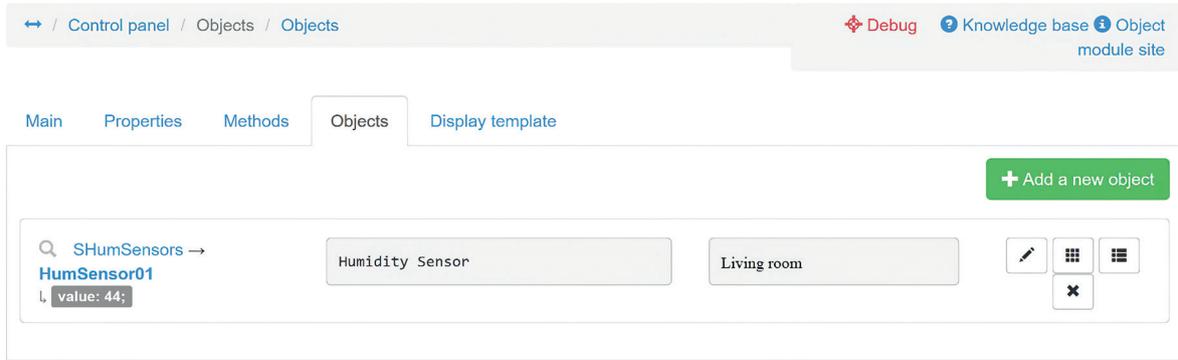


Fig. 4. Instantiated humidity sensors

After updating the system, you can see that the temperature and humidity on the MajorDoMo homepage have been gradually changing over time, with a frequency of once per minute, as shown in Fig. 5.

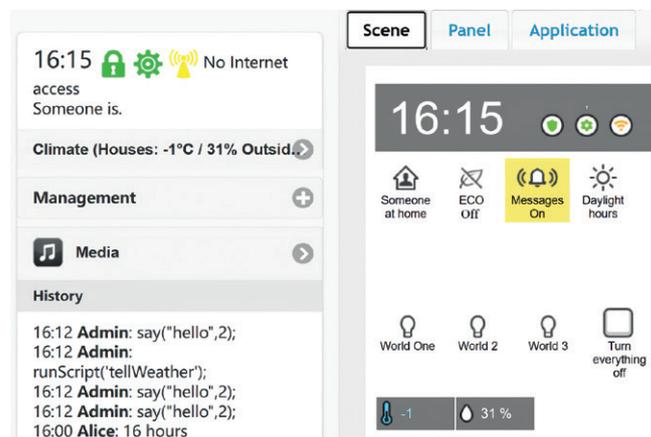


Fig. 5. The display of temperature and humidity data

Then the threshold values for the air conditioner and fan controllers are set during programming, these threshold values are recorded in the created StatusUpdated functions (air conditioner and fan, respectively) in order to achieve a status change depending on the temperature and humidity in the room. Then we set the temperature threshold for calling the air conditioner at 25 and similarly set the threshold for starting the fan when the humidity reaches 50 %, and selected “do not call the parent function” in the settings.

The test results are shown in Fig. 6, where the horizontal line reflects the change of temperature value, the dotted line reflects the change of humidity value, and round dots reflect the change of status of the fan and air conditioner, respectively.

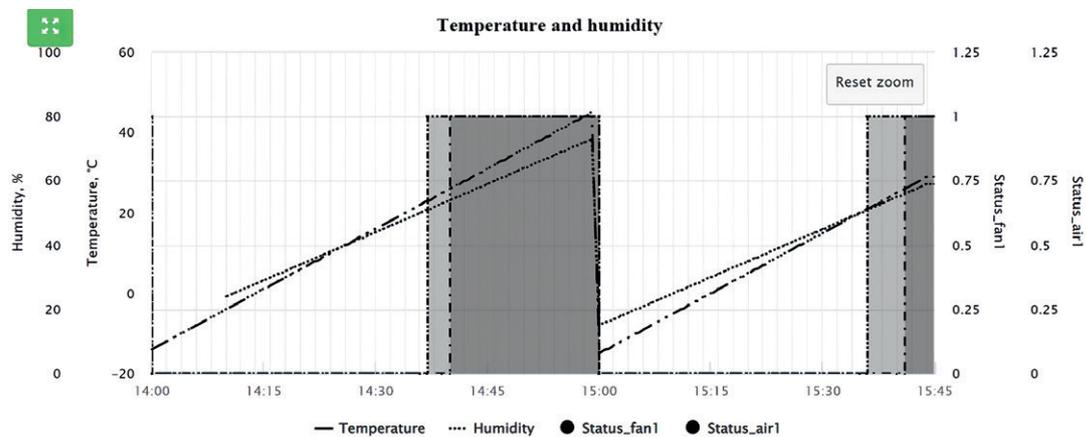


Fig. 6. The process of smart home data regulation

As shown in Fig. 7, for an air conditioner, it did not work when the temperature was below or equal to 25 degrees, and started working when the value exceeded the threshold value.

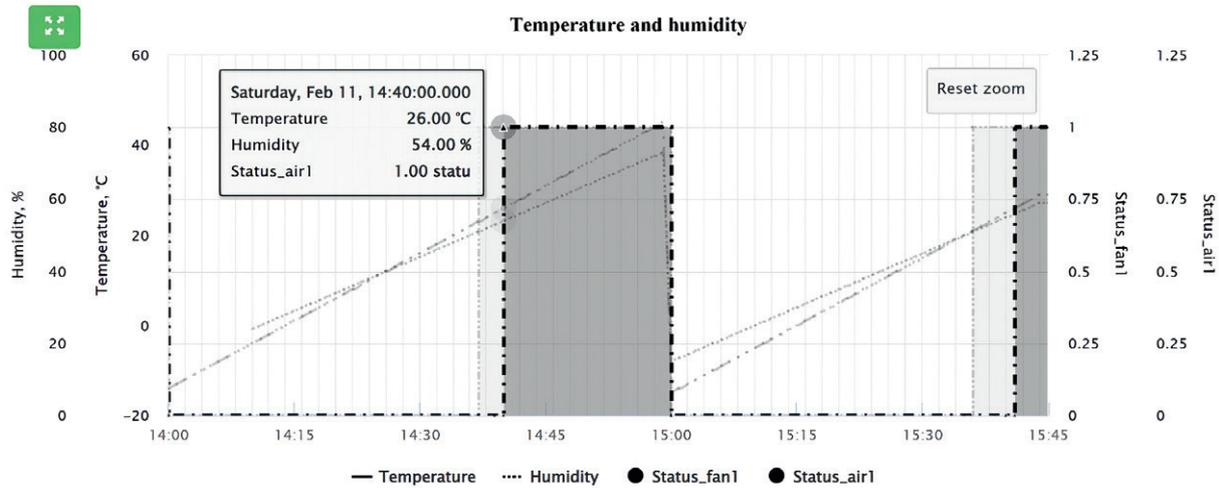


Fig. 7. Air conditioning management

As for the fan, it did not work when the humidity was below or equal to 50 degrees, and started working when its value exceeded the threshold value (Fig. 8).

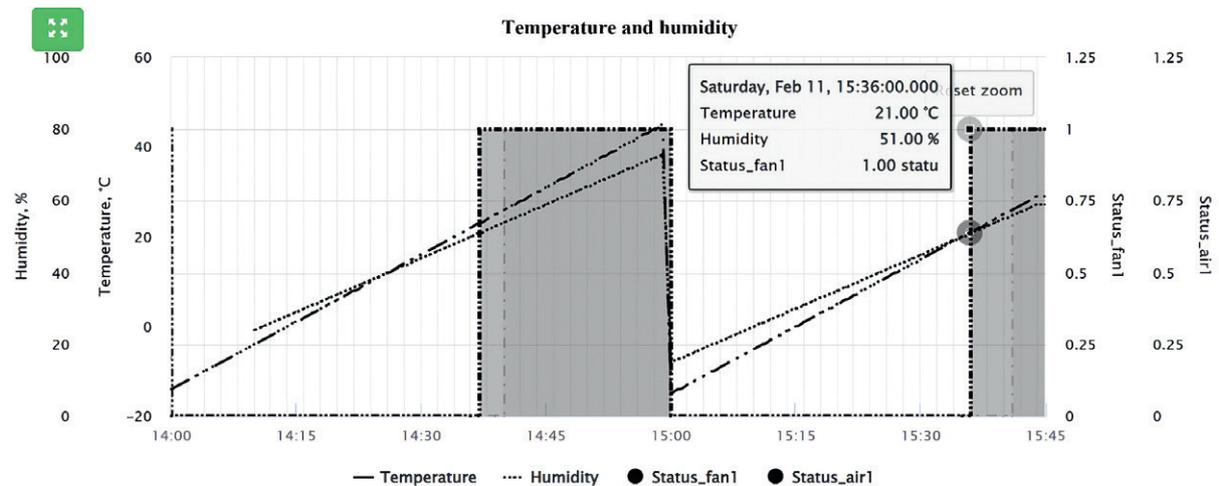


Fig. 8. Fan management

In addition, users can log into the Internet of Things platform and directly change the threshold value of temperature and humidity.

## Conclusion

1. The simulation of an intelligent smart home management system based on the IoT local platform MajorDoMo is presented. Four different components are given for the implementation of four models of interaction with the external environment, including Internet, fog and cloud computing. The possibilities of using this platform for the implementation of an intelligent control system with the collection and processing of data for decision-making (using product rules) are shown. After forming a real-time decision-making model, the process of regulating the data of the home environment using the PHP scripting language is implemented.

2. Thresholds of maximum temperature and humidity are set, if the value of the corresponding sensor exceeds the threshold value, the device turns on, otherwise it is turned off. When the humidity was higher than the threshold value, the fan turned on, and when the temperature was higher than the threshold value, the air conditioner turned on. During the simulation, since there was no corresponding sensor, a timer was used to simulate real-time data collection.

## References

1. Kadam R., Mahamuni P., Parikh Y. (2015) Smart Home System. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*. 2 (1), 81–86.
2. Zeng H. Y., Zheng X., Wei Y. (2023) Research on Smart Home Control System Design Based on Internet of Things Technology. *Electronic Production*. 31 (1), 116–120. <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/dzzz202301030>.
3. AmSuk O. (2018) Design and Implementation of Smart Home Remote Control Based on Internet of Things Service Platform. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*. 22 (12), 1563–1570. Available: <https://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.12.1563>.
4. Vishnyakou U. A., Yu C. Y. (2022) Modeling IoT Smart Home Network. *Doklady BGUIR*. 20 (6), 78–84. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-6-78-84>.
5. Jenal M., Omar A. N., Hisham M. A., Noh W. N., Razali Z. A. (2022) Smart Home Controlling System. *Journal of Electronic Voltage and Application*. 3 (1), 92–104.
6. Zhang L., Leung H., Chan K. C. C. (2008) Information Fusion Based Smart Home Control System and its Application. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 54 (3), 1157–1165.
7. Papadopoulos N., Meliones A., Economou D., Karras I., Liverezas I. (2009) A Connected Home Platform and Development Framework for Smart Home Control Applications. *2009 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Industrial Informatics*. 402–409. Doi: 10.1109/INDIN.2009.5195838.
8. Mao B., Xu K., Jin Y. H., Wang X. L. (2017) DeepHome: a Control Model of Smart Home Based on DeepLearning. *Chinese Journal of Computers*. 40 (8), 1–15. <https://www.cnki.net/kcms/detail/11.1826.tp.20170221.1009.002.html>.
9. Gololobov V. (2019) *IoT as Intranet of Things with Raspberry Pi and MajorDoMo*. Moscow.
10. Russell S., Norvig P. (2020) *Artificial Intelligence: a Modern Approach*, 4<sup>th</sup> ed. *Pearson*. 1136.

## Author's contribution

Vishniakou U. A. carried out the task setting for the article, proposed topics, suggested and provided information on the experimentally, selected IoT platform.

ChuYue Yu performed experiments, plotted diagrams, recorded experiments.

## Information about the authors

**Vishniakou U. A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Professor at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**ChuYue Yu**, Postgraduate at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 44 486-71-82  
E-mail: 1259017720@qq.com  
ChuYue Yu



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.384.3

## ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ УЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ БОЛОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

ЧАН ВАН ЧИЕУ<sup>1</sup>, И. Ю. ЛОВШЕНКО<sup>1</sup>, В. Р. СТЕМПИЦКИЙ<sup>1</sup>,  
К. В. КОРСАК<sup>1</sup>, ЧАН ТУАН ЧУНГ<sup>2</sup>,  
ДАО ДИНЬ ХА<sup>2</sup>, В. В. КОЛОС<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>Вьетнамский государственный технический университет  
имени Ле Куи Дона (Ханой, Вьетнам)

<sup>3</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** В статье приведен сравнительный анализ характеристик основных типов болометров. Исследовано конструктивное решение неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа, сформированного по технологии микроэлектромеханических систем. Посредством компьютерного моделирования в современных системах автоматизированного проектирования в микроэлектронике для оценки влияния механических напряжений, возникающих в конструктивных материалах при их формировании, на величину деформации выполнен статический механический анализ. Установлено, что для обеспечения нормального функционирования микроболометра (уменьшения максимального отклонения пленки от номинального значения) необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr. Для пленок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, напротив, это значение следует увеличивать.

**Ключевые слова:** интегральный неохлаждаемый тепловой детектор, микроболометр, моделирование, механические напряжения, деформация.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Исследования выполнены при финансовой поддержке и в рамках решения задач задания 3.3 Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 гг.

**Для цитирования.** Применение систем автоматизированного проектирования для учета механических напряжений при разработке неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / Чан Ван Чиеу [и др.] // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 1. С. 72–80 <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80>.

## APPLICATION OF CAD SYSTEMS TO ACCOUNTING FOR MECHANICAL STRESSES IN THE DEVELOPMENT OF UNCOOLED THERMAL DETECTORS OF THE BOLOMETRIC TYPE

TRAN VAN TRIEU<sup>1</sup>, IVAN YU. LOVSHENKO<sup>1</sup>, VIKTOR R. STEMPIITSKY<sup>1</sup>,  
KIRILL V. KORSACK<sup>1</sup>, TRAN TUAN TRUNG<sup>2</sup>, DAO DINH HA<sup>2</sup>, VLADIMIR V. KOLOS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

<sup>2</sup>Le Quy Don University of Science and Technology (Hanoi, Vietnam)

<sup>3</sup>Joint-Stock Company "INTEGRAL" – Manager Holding Company "INTEGRAL"  
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 27.01.2023

**Abstract.** A comparative analysis of the characteristics of the main types of bolometers is indicated in the article. The constructive solution of an uncooled thermal detector of the bolometric type, formed using the technology of microelectromechanical systems, is studied. By means of computer simulation in modern computer-aided design systems in microelectronics, a static mechanical analysis was performed to assess the effect of mechanical stresses arising in structural materials during their formation on the magnitude of deformation. It has been established that to ensure the normal functioning of the microbolometer (to reduce the maximum deviation value of the film from the nominal value), it is necessary to reduce the internal mechanical stresses in the NiCr film. For the Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> films, on the contrary, this value should be increased.

**Keywords:** integral uncooled thermal detector, microbolometer, modeling, mechanical stresses, deformation.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The research was carried out with financial support and as part of solving the tasks of assignment 3.3 of the state research program "Photonics and electronics for innovation", 2021–2025.

**For citation.** Tran Van Trieu, Lovshenko I. Yu., Stempitsky V. R., Korsak K. V., Tran Tuan Trung, Dao Dinh Ha, Kolos V. V. (2023) Application of Cad Systems to Accounting for Mechanical Stresses in the Development of Uncooled Thermal Detectors of the Bolometric Type. *Digital Transformation*. 29 (1), 72–80. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-1-72-80> (in Russian).

### Введение

Области применения тепловых детекторов постоянно расширяются, например, в таких сферах, как системы безопасности и наблюдения, пожаротушение, биомедицина. Наиболее перспективное направление развития устройств данного типа – создание эффективных конструкций неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа (микроболометров), которые представляют собой резистивный элемент, выполненный из материала с низкой теплоемкостью и высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), чтобы поглощаемое излучение вызывало существенное изменение сопротивления активного слоя. В отличие от полупроводников в этом материале должно отсутствовать прямое фотонно-электронное взаимодействие, а основным механизмом и причиной изменения сопротивления должен служить нагрев структуры. При пропускании точно контролируемого тока смещения через детектор определяется изменение выходного напряжения. В статье исследовано конструктивное решение микроболометра, сформированного по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) и обладающего рядом значимых преимуществ перед другими реализациями аналогичных по функционалу и назначению приборов: малая потребляемая мощность, относительно низкая стоимость, возможность функционирования при комнатной температуре [1–3].

Существенный фактор, требующий учета при проектировании МЭМС, – анализ влияния внутренних механических напряжений, возникающих вследствие нагрева или других причин, на характеристики структуры прибора. Анализ указанных физических процессов может быть осуществлен в рамках компьютерного моделирования. Применяемое специальное программное обеспечение должно позволить решить комплекс задач математической физики (деформации твердого тела, теплопроводности, диффузии, электростатики, гидродинамики и др.). Универсальные пакеты конечного элементного анализа, такие как ANSYS, Algor, COMSOL Multiphysics (Femlab) и другие, обеспечивают решение описанных выше задач [4]. С точки зрения соотноше-

ния скорости моделирования, точности получаемых результатов и доступных функциональных возможностей наиболее оптимальным решением является использование программного комплекса компании Coventor (<https://www.coventor.com/>), который позволяет реализовать полный цикл проектирования МЭМС-устройства с функцией экспорта результатов в программные продукты схемно-топологического и математического моделирования типа MATLAB и Cadence Virtuoso, а также имеет возможности расширения функционала и включения собственных моделей за счет интегрированного Python-интерпретатора.

### Конструктивные решения и материалы МЭМС-микроболометров

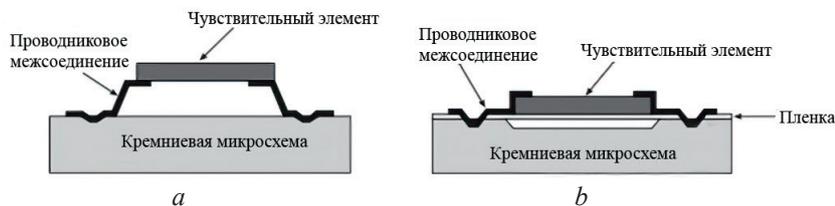
Разработка современной технологии болометров началась в начале 1980-х годов компаниями Honeywell [5] (в рамках исследований технологических процессов формирования тонкопленочных элементов на основе оксида ванадия) и Texas Instruments [1] (при изучении возможных областей применения аморфного кремния ( $\alpha$ -Si)). В зависимости от используемого в качестве активного (детектирующего) элемента термочувствительного материала выделяют металлические, полупроводниковые (кремниевые, германиевые и другие), сверхпроводящие болометры, а также термисторы. Характеристики основных типов болометров представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики основных типов болометров  
**Table 1.** Characteristics of the main types of bolometers

Тип/Type	$D^*$ , см·Гц <sup>1/2</sup> /Вт, ×10 <sup>8</sup>	ЭМШ, Вт/Гц <sup>1/2</sup> , ×10 <sup>-10</sup>	$\tau_{th}$ , мс	Размер, мм <sup>2</sup> / Size, mm <sup>2</sup>
Кремниевый болометр	–	$3 \cdot 10^{-5}$	8	От 0,25 до 0,70
Металлический болометр	1	–	10	–
Термистор	От 1 до 6	–	От 1 до 8	От 0,01 до 10,00
Германиевый болометр	–	$5 \cdot 10^{-3}$	0,4	1,5
Углеродный болометр	–	0,05	10	20
Сверхпроводящий болометр	–	0,5	0,5	1,25
Термопара	–	От 2 до 10	От 10 до 40	От 0,1 до 0,9
Термобатарея	–	–	От 3,3 до 10,0	От 1 до 100
Пироэлектрики	От 2 до 5	–	От 10 до 100	4
Ячейка Голея	10	0,6	От 10 до 30	10

*Обозначения:*  
 $D^*$  – удельная обнаружительная способность;  
 ЭМШ – эквивалентная мощность шума;  
 $\tau_{th}$  – постоянная времени (время отклика).

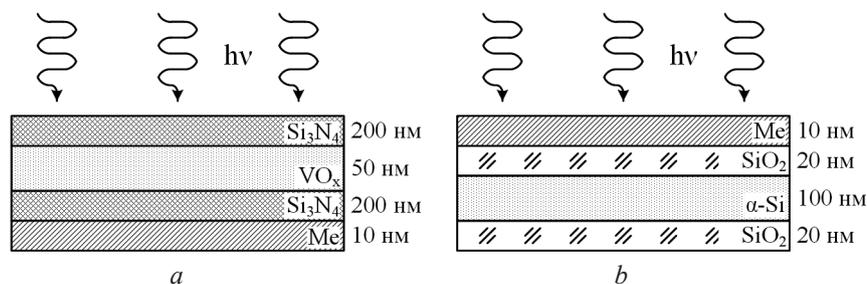
Один из первых вариантов МЭМС-микроболометра предложен в [6]. Он представляет собой тонкую подложку из кремния Si, поддерживаемую узкими ножками, формируемую с помощью методов оптической литографии. На обратной стороне подложки в качестве материала для поглощения использовали висмут (Bi), но термочувствительный слой создавали непосредственно в кремниевой подложке путем имплантации ионов фосфора (P) и бора (B). Производительность болометра оказалась невысокой. Два типовых варианта структуры МЭМС-микроболометров представлены на рис. 1 [7].



**Рис. 1.** Конструктивные решения элемента теплового детектора (МЭМС-болометра):  
 а – микромостовой детекторный элемент; б – элемент детектора с опорой на пленку  
**Fig. 1.** Thermal detector element design (MEMS bolometer): a – microbridge detector element;  
 b – detector element supported by a film

Конструктивное решение, изображенное на рис. 1, *a*, содержит термочувствительные элементы, которые опираются на микромостики, расположенные над поверхностью интегральных микросхем (ИМС) обработки данных. Микромостики сконструированы так, чтобы иметь высокое тепловое и низкое электрическое сопротивление, дабы не препятствовать протеканию тока через структуру. Концепция, приведенная на рис. 1, *b*, состоит из элементов детектора, нанесенных на тонкую диэлектрическую пленку, которая копланарна поверхности пластины и является основой технологии монокристаллических детекторов [7–9].

Основными требованиями к термочувствительным материалам, используемым в микроболометрах, являются высокий ТКС, умеренное удельное сопротивление, низкий уровень шума и совместимость с технологией кремниевых (Si) ИМС. Наиболее часто применяемые термочувствительные материалы – оксид ванадия ( $VO_x$ ), аморфный и поликристаллический кремний, некоторые металлы [10–12]. На рис. 2 показаны структуры слоев активной (термочувствительной) области микроболометра на основе  $VO_x$  и  $\alpha$ -Si.



**Рис. 2.** Структура слоев термочувствительной области микроболометра: *a* –  $VO_x$ ; *b* –  $\alpha$ -Si  
**Fig. 2.** Layer structure of the thermosensitive region of the microbolometer: *a* –  $VO_x$ ; *b* –  $\alpha$ -Si

Ванадий представляет собой металл с переменной валентностью, образующий большое количество оксидов, среди которых наиболее исследованы  $VO_2$ ,  $V_2O_3$  и  $V_2O_5$ . Следует отметить, что указанные оксиды характеризуются значительными различиями в электрических и оптических свойствах [13–16]. С точки зрения применения в качестве конструктивного элемента микроболометра лучшим свойством, которым обладает  $VO_x$ , является его высокий отрицательный ТКС при температуре окружающей среды, превышающий 3 %/К. Пленки  $VO_x$  получают методами реактивного радиочастотного напыления, импульсного лазерного осаждения, отжига и окисления испаренного ванадия в контролируемых условиях [17]. При этом важная задача – получение высокого ТКС в сочетании с достаточно малым сопротивлением пленки [18, 19].

Аморфный кремний  $\alpha$ -Si широко используется в качестве активного слоя в тонкопленочных транзисторах для жидкокристаллических дисплеев, фотоэлектрических устройств малой площади и солнечных батарей [20]. Он имеет характерные значения ТКС при комнатной температуре в диапазоне от  $0,025\text{ K}^{-1}$  для легированных пленок с малым удельным сопротивлением до  $0,06\text{ K}^{-1}$  для материалов с большим удельным сопротивлением [21]. Использование аморфного кремния позволяет уменьшить размеры пикселя [22], при этом крайне важно, чтобы чувствительный элемент микроболометра был теплоизолирован. Наилучшая теплоизоляция и самые низкие тепловые характеристики достигаются в конструкциях МЭМС, которые применяются в системах инфракрасных решеток в фокальной плоскости (IRFPA).

В настоящее время разработка неохлаждаемых фокально-плоскостных матриц (FPA – Focal Plate Arrays), которые являются базовым конструктивным элементом микроболометра, идет в двух направлениях:

- матрицы для коммерческих устройств и систем двойного применения высокого класса чувствительности с максимально возможной производительностью;
- матрицы для коммерческих устройств с минимально возможной стоимостью.

При этом ключевой фактор – поиск высокопроизводительного датчика вместе с высокой теплоизоляцией на минимально возможной площади. При подвешивании (закреплении) термочувствительного элемента подложки в форме перемычки, чтобы свести к минимуму потери тепла из-за проводимости через подложку, применяются различные методы микрообработки. Чаще всего реализуемый подход к изготовлению болометров – формирование их с использованием поверхностных МЭМС-микромостов. Технология поверхностной микрообработки позволяет наносить термочувствительные слои с очень малыми толщиной и массой, с хорошей термоизоляцией по-

верх микромостов, расположенных над поверхностью. Термически изолированные и подвешенные детекторные структуры получают после удаления временных слоев между конструкциями микромостов и схемой считывания.

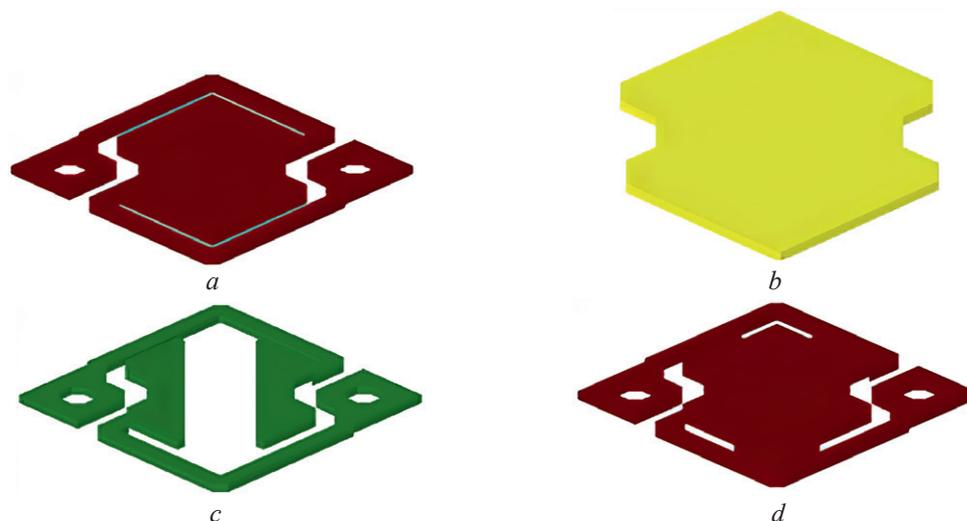
### Методика проведения моделирования

Для описания поведения МЭМС-устройств применяются различные подходы: аналитические, с помощью поведенческих моделей (ROM), с использованием дискретной модели на основе конечных элементов, а также сочетание нескольких способов описания.

Программный комплекс компании Coventor – одна из наиболее перспективных систем автоматизированного проектирования для МЭМС. Главным преимуществом данного продукта является возможность прохождения полного цикла проектирования устройства за относительно короткий промежуток времени. Используя инструмент CoventorWare, можно создать описание приборной структуры, задать параметры исходных материалов и выполнить моделирование эксплуатационных характеристик болометра, учитывающих влияние внутренних механических напряжений и механических напряжений, вызванных внешним воздействием. Результаты проектирования устройств, созданных в инструменте CoventorMP, легко могут быть интегрированы с большинством смежных программных продуктов для дальнейшего анализа получившихся устройств, а именно с MATLAB, Cadence Virtuoso, MathWorks Simulink и т. д. Весомый аргумент – поддержка консолью CoventorMP скриптов, написанных на языке программирования Python. Данная возможность позволяет в более полной мере использовать высокопроизводительные вычислительные ресурсы. Кроме того, немаловажную роль играет возможность моделирования объемных устройств из заранее подготовленных плоских моделей, что существенно расширяет спектр функций данного программного продукта и увеличивает скорость проектирования.

### Приборная структура и результаты моделирования

Стандартная конструкция микроболометра состоит из одной подвесной многослойной мембраны и длинных опорных ножек [23]. Мембрана включает пленки из диэлектрического и термочувствительного материала, проводящие и поглощающие слои. Основным механизмом передачи тепла является теплопроводность от термочувствительного материала к подложке через несущую конструкцию, которая выполняет три функции: механическую, токопроводящую и теплопроводную. В качестве конструктивных, токопроводящих и теплопроводных материалов могут использоваться Si [7], NiCr, Ti, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [9, 24], SiGe [25], TiN, TiW, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [26], двумерные материалы [27] и др. На рис. 3 изображены слои исследуемой микроболометрической структуры с коэффициентом заполнения  $S_a/S_f = 0,66$ . Характеристики используемых конструкционных материалов представлены в табл. 2.



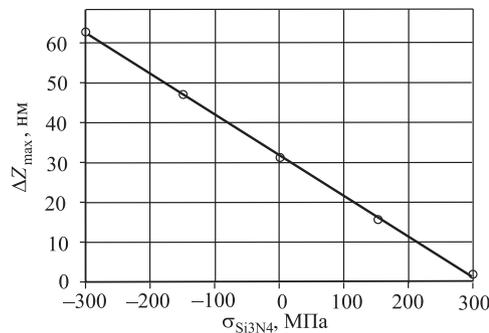
**Рис. 3.** Вид микроболометрической структуры с толщиной каждого из слоев 0,1 мкм:  
*a* – первый слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; *b* –  $\alpha$ -Si; *c* – NiCr; *d* – второй слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**Fig. 3.** View of the microbolometric structure with thickness of each layer 0.1  $\mu$ m:  
*a* – first layer of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>; *b* –  $\alpha$ -Si; *c* – NiCr; *d* – second layer of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

**Таблица 2.** Характеристики  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и NiCr, используемых в качестве элементов конструкции микроболометра  
**Table 2.** Properties of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and NiCr used as microbolometer construction elements

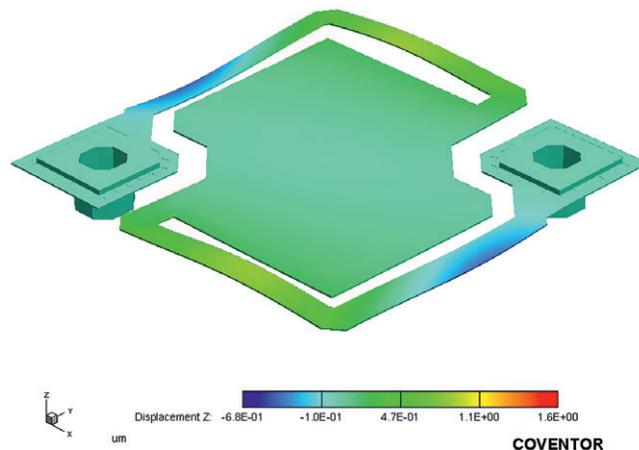
Параметр/Parameter	Значение параметра для материала/Parameter value for material	
	$\text{Si}_3\text{N}_4$	NiCr
Константа упругости (изотропная модель)	$E = 2,22 \cdot 10^5, \mu = 0,27$	$E = 104, \mu = 0,20$
Плотность, кг/мкм <sup>3</sup>	$2,7 \cdot 10^{-15}$	$4,6 \cdot 10^{-15}$
Экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления, 1/К	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,44 \cdot 10^{-5},$ $ZST = 2,7315 \cdot 10^2$
Теплопроводность, пВт/(мкм·К)	$2,0 \cdot 10^6$	$2,08 \cdot 10^7$
Удельная теплоемкость, пДж/(кг·К)	$1,7 \cdot 10^{14}$	$5,0 \cdot 10^{14}$
Электрическая проводимость, пСм/мкм	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,83 \cdot 10^{12}$

Посредством компьютерного моделирования (статического механического анализа) в программном комплексе компании Coventor выполнено исследование влияния механических напряжений, возникающих в конструктивных материалах приборных структур микроболометров при их формировании, на величину деформации (максимальное отклонение по оси Z). Значения внутренних механических напряжений в конструктивных материалах  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и NiCr варьировались в пределах  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$  от минус 300 до 300 МПа и  $\sigma_{\text{NiCr}}$  от минус 1000 до 1000 МПа. Изучено влияние механических напряжений в пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,1 мкм, подвешенной на высоте 2,5 мкм над кремниевой подложкой на столбиках из NiCr. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимость максимального отклонения по оси Z от  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$   
**Fig. 4.** Dependence of the maximum deviation on the axis Z of  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$

Установлено, что механические напряжения  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$  от минус 300 до 300 МПа обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока. Наиболее оптимальное значение внутренних механических напряжений составляет 300 МПа. Отмечено, что воздействие теплового потока  $P$  величиной более 300 пВт/мкм<sup>2</sup> приводит к полному разрушению конструкции из-за низкой теплопроводности  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На рис. 5 представлена структура пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа и  $P = 300$  пВт/мкм<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** Структура пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа и  $P = 300$  пВт/мкм<sup>2</sup>  
**Fig. 5.** Structure of the  $\text{Si}_3\text{N}_4$  film at  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа and  $P = 300$  pW/ $\mu\text{m}^2$

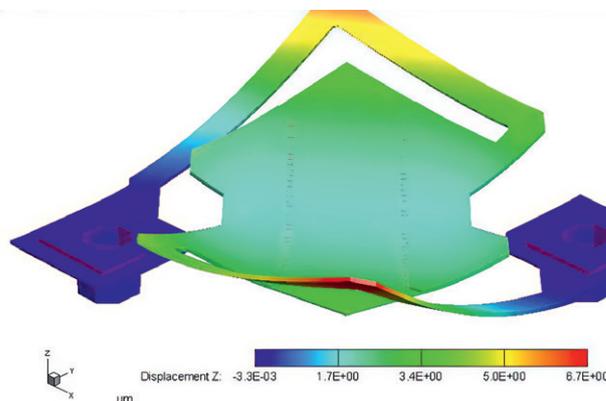
Исследовано влияние механических напряжений в пленках  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и NiCr толщиной 0,1 мкм, подвешенных на высоте 2,5 мкм над кремниевой подложкой на столбиках из NiCr. Результаты моделирования при нормальных условиях (отсутствие теплового потока) приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты моделирования при нормальных условиях (тепловой поток отсутствует)

**Table 3.** Simulation results under normal conditions (no heat flow)

$\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ , МПа/ $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ , МПа	Максимальное отклонение по оси Z, мкм, при $\sigma_{\text{NiCr}}$ , МПа/ Maximum deviation along the Z axis, $\mu\text{m}$ , at $\sigma_{\text{NiCr}}$ , МПа								
	-1000	-750	-500	-250	0	250	500	750	1000
-300	6,733	4,950	3,210	1,514	0,324	1,990	3,570	5,060	6,480
-200	6,767	5,027	3,259	1,541	0,270	1,970	3,530	5,020	6,440
-100	6,811	5,050	3,308	1,588	0,215	1,930	3,490	4,980	6,390
0	6,893	5,122	3,358	1,655	0,160	1,867	3,446	4,941	6,358
100	6,943	5,195	3,407	1,709	0,104	1,841	3,404	4,914	6,336
200	7,033	5,226	3,456	1,730	0,048	1,800	3,360	4,870	6,290
300	7,072	5,266	3,516	1,777	0,009	1,740	3,320	4,830	6,260

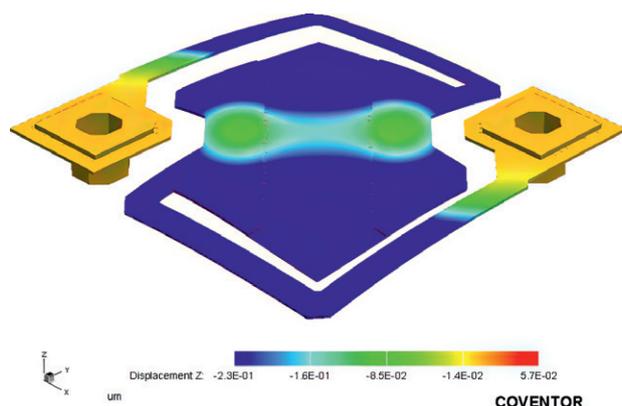
Установлено, что механические напряжения  $\sigma_{\text{NiCr}}$  оказывают существенное влияние на деформацию конструкции. Не рекомендуется получать пленки со значением  $\sigma_{\text{NiCr}}$  не попадающим в диапазон от минус 100 до 100 МПа, поскольку приборные структуры с такими пленками не обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока (рис. 6).



**Рис. 6.** Структура  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  при  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа и  $\sigma_{\text{NiCr}} = -1000$  МПа (тепловой поток отсутствует)

**Fig. 6.** Structure of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  at  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа and  $\sigma_{\text{NiCr}} = -1000$  МПа (no heat flow)

Анализируя результаты исследования, можно отметить, что конструкция  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  более устойчива к воздействию тепловых потоков с показателем более 100 пВт/мкм<sup>2</sup>. Конструкция  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  с  $\sigma_{\text{NiCr}} = 0$  МПа и  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа остается стабильной при воздействии теплового потока величиной до  $P = 700$  пВт/мкм<sup>2</sup>. При этом максимальное отклонение по оси Z не превышает 9 нм для  $P = 0$  пВт/мкм<sup>2</sup>, 227 нм для  $P = 100$  пВт/мкм<sup>2</sup>, 457 нм для  $P = 200$  пВт/мкм<sup>2</sup>, 901 нм для  $P = 400$  пВт/мкм<sup>2</sup> и 1,5 мкм для  $P = 700$  пВт/мкм<sup>2</sup>. На рис. 7 представлен результат моделирования конструкции  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  при  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа и  $P = 700$  пВт/мкм<sup>2</sup>.



**Рис. 7.** Структура  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  при  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа и  $P = 700$  пВт/мкм<sup>2</sup>

**Fig. 7.** Structure of  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{NiCr}$  at  $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$  МПа and  $P = 700$  пВт/мкм<sup>2</sup>

## Заключение

1. Посредством компьютерного моделирования исследовано влияние внутренних механических напряжений на деформацию приборных структур микроболометров в отсутствие и при воздействии теплового потока. Для обеспечения нормального функционирования микроболометра (уменьшения максимального отклонения пленки от номинального значения) необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr. Для пленок Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, напротив, это значение нужно увеличить.

2. Механические напряжения  $\sigma_{\text{NiCr}}$  оказывают существенное влияние на деформацию конструкции. Не рекомендуется получать пленки со значением  $\sigma_{\text{NiCr}}$ , не попадающим в диапазон от минус 100 до 100 МПа, поскольку приборные структуры с такими пленками не обеспечивают стабильность конструкции в отсутствие теплового потока.

## References

1. Wood R. A., Han C. J., Kruse P. W. (1992) Integrated Uncooled Infrared Detector Imaging Arrays. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 5<sup>th</sup> Technical Digest, IEEE*. 132–135.
2. Takamuro D., Tomohiro M., Takaki S. (2011) Development of New SOI Diode Structure for Beyond 17-um-Pixel Pitch SOI Diode Uncooled IRFPAs. *Proceedings of SPIE – the International Society for Optical Engineering*. (8012), 80121E.
3. Li C., Han C. J., Skidmore G. D., Hess C. (2010) DRS Uncooled VO<sub>x</sub> Infrared Detector Development and Production Status. *Proc SPIE*. (7660), 76600V.
4. Kolovsky A. A., Levitsky A. A., Marinushkin P. S. (2008) Computer Modeling of MEMS Components. *Problems of Development of Promising Micro- and Nanoelectronic Systems*. (1), 398.
5. Flannery R. E., Miller J. E. (1989) Status of Uncooled Infrared Imagers. *Journals of SPIE*. (1), 379.
6. Downey P. M., Jeffries A. D., Meyer S. S., Weiss R., Bachner F. J., Donnelly J. P., Lindley W. T., Mountain R. W., Silversmith D. J. S. (1984) Monolithic Silicon Bolometers. *Appl. Opt.* (23), 14.
7. Liddiard K. C. (1993) Thin Film Monolithic Arrays for Uncooled Thermal Imaging. *Proc. SPIE*. (16), 206.
8. Unewisse M. H., Passmore S. J., Liddiard K. C., Watson R. J. (1994) Performance of Uncooled Semiconductor Film Bolometer Infrared Detectors. *Proc. SPIE*. (43), 52.
9. Wood R. A. (1993) High-Performance Infrared Thermal Imaging with Monolithic Silicon Focal Planes Operating at Room Temperature. *Technical Digest*. (77), 175.
10. Cole B. E., Higashi R. E., Wood R. A. (2000) Micromachined Pixel Arrays Integrated with CMOS for Infrared Applications. *Int. Conf. on Optical MEMS, IEEE*. 63.
11. Syllaios A. J., Schimert T. R., Gooch R. W., McCardel W. L., Ritchey B. A., Tregilgas J. H. (2000) Amorphous Silicon Microbolometer Technology. *Proc. Mater. Res. Soc., San Francisco, CA, USA*. 609, A14.4.
12. Mottin E., Astrid B., Jean-Luk M. (2003) Uncooled Amorphous Silicon Technology Enhancement for 25-um-Pixel Pitch Achievement. *Proc. SPIE Infrared Technology and Applications XXVIII, Seattle USA*. 4820, 200.
13. Jerominek H., Picard F., Vincent D. (1993) Vanadium Oxide Films for Optical Switching and Detection. *Opt. Eng.* (32), 99.
14. Kuźma E. (1993) Contribution to the Technology of Critical Temperat. Resistors. *Electron Technol.* 26 (2/3), 129.
15. Jerominek H., Pope T. D., Renaud M., Swart N. R., Picard F., Lehoux M., Savard S. (1997) 64×64, 128×128 and 240×320 Pixel Uncooled IR Bolometric Detector Arrays. *Proc. SPIE*. (30), 47.
16. Chen C., Yi X., Zhang J., Xiong B. (2001) Micromachined Uncooled IR Bolometer Linear Array Using VO<sub>2</sub> Thin Films. *Int. J. Infrared Millim. Waves*. (22), 53.
17. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. (2007) MEMS-based Uncooled Infrared Bolometer Arrays: a Review. *Proc. SPIE*. (68), 36.
18. Soltani M., Chaker M., Haddad E., Kruzelecky R. V., Margot J. (2004) Effects of Ti-W Codoping on the Optical and Electrical Switching of Vanadium Dioxide Thin Films Grown by a Reactive Pulsed Laser Deposition. *Appl. Phys. Lett.* (85), 60.
19. Han Y. H., Kim K. T., Shin H. J., Moon S. (2005) Enhanced Characteristics of an Uncooled Microbolometer Using Vanadium-Tungsten Oxide as a Thermoelectric Material. *Appl. Phys. Lett.* (86), 3.
20. Syllaios A. J., Schimert T. R., Gooch R. W., McCardel W. L., Ritchey B. A., Tregilgas J. H. (2000) Amorphous Silicon Microbolometer Technology. *MRS Proc.* (14), 6.
21. Liddiard K. C., Ringh U., Jansson C., Reinhold O. (1998) Progress of Swedish-Australian Research Collaboration on Uncooled Smart IR Sensors. *Proc. SPIE*. (34), 84.
22. Tisse C.-L., Tissot J.-L., Crastes A. (2012) An Information-Theoretic Perspective on the Challenges and Advances in the Race Toward 12 μm Pixel Pitch Megapixel Uncooled Infrared Imaging. *Proc. SPIE*. (8353), 83531M-1.
23. Wang J., Li W., Gou J., Wu Z., Jiang Y. (2014) Fabrication and Parameters Calculation of Room Temperature Terahertz Detector with Micro-bridge Structure. *J. Infrared Milli Terahertz Waves*. 35 (12), 987–1082.
24. Safy M., Zaky A. H., Mitkes A. (2008) Thermal Modeling of a High Fill-factor Micromachined Bolometer for Thermal Imaging Applications. *ICEENG The International Conference on Electrical Engineering*. 6.

25. Malm G. B. (2012) Micromechanical Process Integration and Material Optimization for High Performance Silicon-Germanium Bolometers. *MRS Online Proceedings Library*. 1437.
26. Varpula A. (2021) Nano-Thermoelectric Infrared Bolometers. *APL Photonics*. 036111.
27. Chiang S.-Y. (2020) 2D Material-Enabled Nanomechanical Bolometer. *Nano Letters*. 2326–2331.

### Вклад авторов

Чан Ван Чиёу выполнил анализ существующих конструктивных решений и провел моделирование эксплуатационных характеристик микроболометра. Ловшенко И. Ю. выполнил интерпретацию результатов моделирования, подготовил рукопись статьи. Стемпицкий В. Р. осуществил постановку задач для проведения исследования, подготовил рукопись статьи. Корсак К. В. выполнил анализ конструктивных решений и применяемых материалов МЭМС-микроболометров. Чан Туан Чунг и Дао Динь Ха выполнили моделирование эксплуатационных характеристик микроболометра. Колос В. В. осуществил постановку задачи для проведения исследования, получил экспериментальные результаты.

### Authors' contribution

Tran Van Trieu analyzed the existing design solutions and conducted a simulation of the operational characteristics of the microbolometer. Lovshenko I. Yu. interpreted the simulation results, prepared the manuscript of the article. Stempitsky V. R. established the task for the research, prepared the manuscript of the article. Korsak K. V. analyzed the design solutions and materials used for the MEMS microbolometers. Tran Tuan Trung and Dao Dinh Ha performed a simulation of the operational characteristics of the microbolometer. Kolos V. V. formulated the tasks for the study, received experimental results.

### Сведения об авторах

**Чан Ван Чиёу**, аспирант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Ловшенко И. Ю.**, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Стемпицкий В. Р.**, к. т. н., доцент, проректор по научной работе, научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и наноэлектронных систем» НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Корсак К. В.**, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Чан Туан Чунг**, к. т. н. Вьетнамского государственного технического университета имени Ле Куи Дона

**Дао Динь Ха**, к. т. н. Вьетнамского государственного технического университета имени Ле Куи Дона

**Колос В. В.**, заместитель заведующего отраслевой лабораторией новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-90  
E-mail: lovshenko@bsuir.by  
Ловшенко Иван Юрьевич

### Information about the authors

**Tran Van Trieu**, Postgraduate at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Lovshenko I. Yu.**, Head of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Stempitsky V. R.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Vice-Rector for Research and Development, Adviser of the Research Laboratory “CAD in Micro- and Nanoelectronics” at the R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Korsak K. V.**, Master’s Student at the Department of Micro- and Nanoelectronics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Tran Tuan Trung**, Cand. of Sci. of the Le Quy Don University of Science and Technology

**Dao Dinh Ha**, Cand. of Sci. of the Le Quy Don University of Science and Technology

**Kolos V. V.**, Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of the Joint-Stock Company “INTEGRAL” – Manager Holding Company “INTEGRAL”

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-90  
E-mail: lovshenko@bsuir.by  
Lovshenko Ivan Yur’evich