
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор В.А. Богущ

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский,
А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк, В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,
А.А. Хмыль, В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Кураев А.А., Матвеев В.В. Улучшенная и упрощенная конструкция резонатора релятивистского гелитрона.....	5
Бельский А.Я., Сацук С.М., Путилин В.Н. Анализ шумовых характеристик диодного генератора в многоконтурной системе	9
Ткачёнок Н.М., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование электрохимическим методом композитных материалов на основе оксида цинка и меди.....	17
Кечик Д.А. Компенсация изменения мощности виброакустического сигнала при изменении скоростного режима оборудования	26
Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Кулешов Ю.Е., Богатырев А.А. Вычисление пространственных координат целей в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации методом Левенберга – Марквардта	35
Ли Вэньцзу. Онтологический подход к автоматической генерации вопросов в интеллектуальных обучающих системах	44
Ревотюк М.П., Хаджинова Н.В., Кузнецов А.П., Шилин Л.Ю. Динамическая асимметричная задача о назначении в открытых многоагентных системах.....	53

Лукашевич В.А., Пономарев В.В., Мицкевич В.Е., Губкин С.В., Гаврилович Ю.А., Журко Е.А., Кипель А.Н. Феноменология инерциальной кинематики в структуре формирования двигательных адаптаций	62
Хаджинова Н.В., Ревотюк М.П., Шилин Л.Ю. Наблюдатель изменений в лесах кратчайших путей на динамических графах транспортных сетей.....	71
Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности биполярных транзисторов с использованием электрического напряжения в качестве имитационного фактора.....	80
Пилецкий И.И., Батура М.П., Шилин Л.Ю. Графовые технологии в интеллектуальной системе комплексного анализа данных интернет-источников.....	89
Приложение	98

Корректурa текста на русском языке и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Корректурa текста на английском языке М.А. ПОЛКАНОВ
Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 25.08.2020. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 11,86. Уч.-изд. л. 9,82. Тираж 100 экз. Заказ 185.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2020

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, room 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by

E-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Improved and simplified design of the relativistic helitron resonator	5
Belski A.Y., Satsyk S.M., Putilin V.N. Analysis of noise characteristics of a diode generator in a multi-circuit system	9
Tkachyonok N.M., Cubenko E.B., Bondarenko V.P. Electrochemical forming of composite materials based on zinc and copper oxide	17
Kechik D.A. Compensation for vibration signal power variance when changing equipment speed mode	26
Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Y., Kuleshov Y.Y., Bogatyrev A.A. Calculation of spatial target coordinates in range-difference passive radars by the Levenberg – Marquardt method	35
Li Wenzu. Ontological approach to automatic generation of questions in intelligent learning systems	44
Revotjuk M.P., Khajynova N.V., Kuznetsov A.P., Shilin L.Y. Dynamic asymmetric assignment problem in open multi-agent systems	53
Lukashevich U.A., Ponomarev U.U., Mitskevich U.E., Gubkin S.V., Gavrilovich Y.A., Zhurko E.A., Kipel A.N. The phenomenology of inertial kinematics in the structure of forming motor adaptations	62
Khajynova N.V., Revotjuk M.P., Shilin L.Y. Observer of changes in the forest of the shortest paths on dynamic graphs of transport networks	71

Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Berasnevich A.I., Kaziuchyts V.O. Individual forecasting of reliability of bipolar transistors by using electrical voltage as a simulation factor	80
Piletski I.I., Batura M.P., Shylin L.Y. Graph technologies in an intelligent system of complex analysis of data from Internet sources	89
Application	98



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-5-8>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385.6

УЛУЧШЕННАЯ И УПРОЩЕННАЯ КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАТОРА РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГЕЛИТРОНА

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

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

Поступила в редакцию 9 января 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Одно из основных направлений в СВЧ электронике – получение сверхбольшой мощности. В вакуумных системах преобразуется энергия электронного потока, где основное повышение выходных мощностей СВЧ устройств возможно только при использовании все более мощных электронных потоков. Увеличение же мощности электронных потоков возможно за счет повышения переносимых ими токов или в результате повышения энергии электронов. Учитывая закон, связывающий токи и напряжения в электронных системах, работающих при ограничении тока пространственным зарядом, получение сверхбольшой мощности электронных потоков связано с использованием электронов с релятивистскими скоростями, т. е. приближающихся к скорости света. Также в настоящее время релятивистские электровакуумные устройства (лампы бегущей волны и лампы обратной волны) используют магнитную фокусировку для линейного релятивистского потока, что значительно усложняет и мешает внедрению простых сверхпроводящих электродинамических систем, так как высокочастотная сверхпроводимость металлов исчезает в постоянных магнитных полях. Между тем использование упрощенных сверхпроводящих структур в сверхмощных приборах позволяет значительно повысить энергетику этих приборов за счет сильного уменьшения омических потерь, что ограничивает энергетику прибора, разрушая рабочую поверхность электродинамической системы при увеличении мощности или длительности импульса генератора. В статье приведена модернизированная конструкция генератора СВЧ нового типа – релятивистского гелитрона. Здесь рассматривается более простая конструкция коаксиального резонатора, полученная благодаря конструктивному исполнению с использованием закритического сужения радиуса внутреннего проводника на моде H_{n11} электромагнитного поля, а не коаксиальный резонатор с режекторными фильтрами.

Ключевые слова: гелитрон, критическая длина волны, коаксиальный волновод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Улучшенная и упрощенная конструкция резонатора релятивистского гелитрона. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 5-8.

IMPROVED AND SIMPLIFIED DESIGN OF THE RELATIVISTIC HELITRON RESONATOR

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

Submitted 9 January 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. One of the main trends in microwave electronics is the ultra-large power production. The electron stream energy is converted inside vacuum systems, where the key moment is increasing output power of microwave devices, which is possible only when using more and more powerful electron streams. Increasing electron stream power is possible due to either enhancing the carried currents or as a result of increasing the electron energy. Given the law that connects currents and voltages in electronic systems operating when the current is limited by a spatial charge, the production of ultra-high-power electron flows is associated with the usage of relativistic velocity electrons, i. e. approaching the light speed. Likewise, at present, relativistic electro-vacuum devices (traveling-wave lamps and backward-wave lamps) use magnetic focusing for linear relativistic streams, which prevents the implementation of simple superconducting electrodynamic systems, because high-frequency metal superconductivity disappears in constant magnetic fields. Meanwhile, simplified ultra-high-power superconducting device structures can significantly increase the device energy due to the strong ohmic loss reduction, which just limits the device energy, destroying the working electrodynamic system surface by increasing power or pulse duration of the generator. The article outlines the modernized design of a new-type microwave generator – the relativistic helitron. The paper considers a simpler coaxial resonator design, obtained by using the supercritical narrowing of the inner conductor radius by the H_{n1l} mode of the electromagnetic field, rather than a coaxial resonator with notch filters.

Keywords: helitron, critical wavelength, coaxial waveguide.

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

For citation. Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Improved and simplified design of the relativistic helitron resonator. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 5-8.

Введение

В статье [1] рассматривалась конструкция коаксиального резонатора релятивистского гелитрона на моде H_{211} с режекторными фильтрами. Однако эта конструкция сложна и может быть заменена более простой, если использовать свойства H_{ni} волн в коаксиальном волноводе. В частности, для волны H_{21} критическая длина волны $\lambda_{21}^H \approx \pi/2(b_1+b_2)$ [2]. Таким образом, возможна простая конструкция резонатора на H_{211} моде с использованием закритического сужения радиуса внутреннего проводника с b_1 до b_{10} . При этом должны выполняться условия: $2\pi(b_1+b_2)/\lambda > 4$, $2\pi(b_{10}+b_2)/\lambda < 4$, где λ – рабочая длина волны гелитрона.

Релятивистский гелитрон – это прибор с центробежной электростатической фокусировкой осесимметричного винтового релятивистского электронного потока, взаимодействующего с H_{n1l} модой электромагнитного поля коаксиального резонатора. На основе численного моделирования и оптимизации показано, что его эффективность превосходит эффективность релятивистских ламп бегущей волны и ламп обратной волны.

Модернизированная конструкция релятивистского гелитрона

На рис. 1 и 2 изображены схемы модернизированной конструкции релятивистского гелитрона. Здесь: 1 – магнитная катушка; 2 – кольцевой термокатод (может применяться и катод со взрывной эмиссией); 3 – прикатодный электрод (венельт); 4 – анод, являющийся

также магнитным экраном и магнитопроводом закручивающей электронный поток магнитной системы; 5 – внешний цилиндр коаксиала; 6 – внутренний проводник коаксиала с закритическим сужением радиуса внутреннего проводника на моде H_{n1l} электромагнитного поля; 7 – моновинтовой электронный поток, 8 – коллектор; r_0 – радиус вращения электрона, b_2 – радиус внешнего цилиндра; b_1 – радиус внутреннего проводника коаксиала с закритическим сужением и b_{10} – часть радиуса внутреннего проводника коаксиала без сужения.

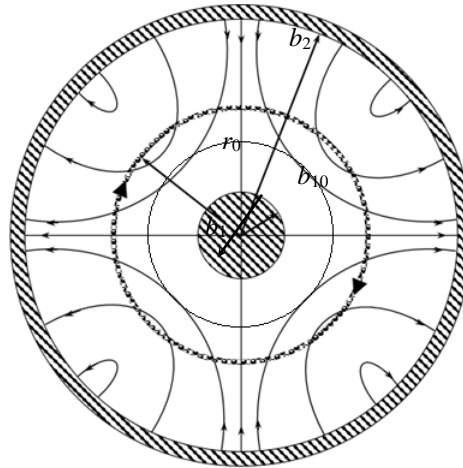


Рис. 1. Схема конструкции коаксиального гелитрона
Fig. 1. The design scheme of the coaxial gelitron

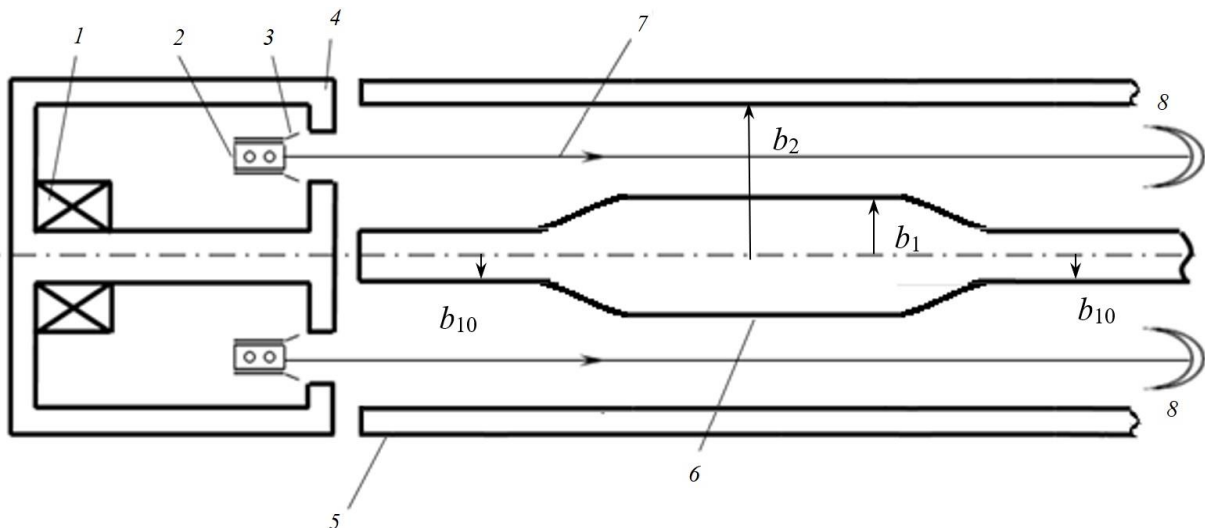


Рис. 2. Резонатор релятивистского гелитрона на моде H_{211} с торцевыми закритическими сечениями внутреннего проводника
Fig. 2. Relativistic gelitron resonator for the H_{211} mode with end supercritical sections of the inner conductor

Заключение

Представленная конструкция резонатора релятивистского гелитрона на моде H_{n1l} электромагнитного поля значительно проще и технологичней, чем предложенная в [1].

Список литературы

1. Кураев А.А., Матвеев В.В. Релятивистский гелитрон. Доклады БГУИР. 2017:109:60-65.
2. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Москва: Советское радио; 1967.

References

1. Kurayev A.A., Matveyenko V.V. [Relyativistskiy gelitron]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017:109:60-65. (In Russ.)
2. Fel'dshteyn A.L., Yavich L.R., Smirnov V.P. [*Spravochnik po elementam volnovodnoy tekhniki*]. Moscow: Sovetskoye radio; 1967. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеенко В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-56;
e-mail kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16>

Оригинальная статья
Original paper

УДК: 621.376.42:621.

АНАЛИЗ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНОГО ГЕНЕРАТОРА В МНОГОКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ

БЕЛЬСКИЙ А.Я., САЦУК С.М., ПУТИЛИН В.Н.

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

Поступила в редакцию 11 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В современной СВЧ электронике крайне актуальна оценка возможности эффективной генерации высокостабильных мод колебаний и создания малошумящих генераторов миллиметрового диапазона длин волн. Цель исследований заключалась в определении типа волны для наиболее эффективных мод колебаний и обеспечения работы различных мод в режиме взаимной синхронизации, которая становится возможной, поскольку в реальные конструкции генераторов могут входить ряд реактивных элементов, которые в диапазоне СВЧ формируют ряд резонансных частот. В данной работе показывается, как можно обеспечить условия генерации на той или иной частоте и одновременно получить высокую стабильность колебаний.

Основными методами исследований являлись: анализ и обобщение литературных данных и результатов собственных исследований особенностей генерирования колебаний в многоконтурной системе генератора на диоде Ганна и условий, при которых устанавливается высокая стабильность частоты; экспериментальные исследования с использованием СВЧ анализаторов спектра, микроволновых устройств. В работе рассчитаны возможные частоты генерации, проведены исследования режимов работы диодного генератора и экспериментально измерены их фазовые шумы. Показано, что при приближении частоты генерации к частоте отсечки волновода с помощью подстроечных элементов конструкции или изменением напряжения питания возникает режим взаимной синхронизации колебаний на высоких гармониках с использованием типа волны H_{102} в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов.

Экспериментально исследован генератор с многоконтурной резонансной системой и получена небольшая величина фазовых шумов для обоих типов волн H_{101} и H_{102} . При этом наилучшие параметры и шумовые характеристики имели место на наиболее низких типах видов колебаний. Данные результаты обладают экспериментальной новизной, что позволяет надеяться на разработку конструктивных решений, обеспечивающих создание высокостабильных малошумящих генераторов миллиметрового диапазона длин волн с минимальными массогабаритными параметрами.

Ключевые слова: многоконтурные системы, генерирование колебаний, режим работы, тип волны, стабильность частоты, шумовые свойства, синхронизация гармоник, резонансные частоты.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Бельский А.Я., Сацук С.М., Путилин В.Н. Анализ шумовых характеристик диодного генератора в многоконтурной системе. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 9-16.

ANALYSIS OF NOISE CHARACTERISTICS OF A DIODE GENERATOR IN A MULTI-CIRCUIT SYSTEM

ALIAKSEI Y. BELSKI, SIARHEI M. SATSYK, ULADZIMIR N. PUTILIN

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

Submitted 11 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In modern microwave electronics, it is extremely important to evaluate the possibility of efficient generation of highly stable oscillation modes and the creation of low-noise generators with a millimeter wavelength range. The purpose of the research was to determine the type of wave for the most effective modes of oscillation and to ensure the operation of various modes in the mode of mutual synchronization, which becomes possible because the real design of generators can include a number of reactive elements that form a number of resonant frequencies in the microwave range. This paper shows how it is possible to provide conditions for generation at a particular frequency and simultaneously obtain high stability of vibrations.

The main research methods were: analysis and generalization of literature data and results of our own research on the peculiarities of oscillation generation in a multi-circuit system of a Gunn diode generator and conditions under which high frequency stability is established; experimental studies using microwave spectrum analyzers, microwave devices. In this paper, the possible generation frequencies are calculated, the operation modes of the diode generator are studied, and their phase noise is experimentally measured. It is shown that when the generation frequency approaches the cut-off frequency of the waveguide with the help of structural elements or by changing the supply voltage, a mode of mutual synchronization of vibrations at high harmonics occurs using the H_{102} wave type in a very narrow range of frequency (phase) noise. A generator with a multi-circuit resonant system was experimentally studied and a small amount of phase noise was obtained for both types of H_{101} and H_{102} waves. At the same time, the best parameters and noise characteristics occurred at the lowest types of vibration types.

These results have an experimental novelty, which allows us to hope for the development of constructive solutions that provide the creation of highly stable low-noise generators of millimeter wavelength range with the minimum mass dimensional parameters.

Keywords: multi-circuit systems, oscillation generation, operation mode, wave type, frequency stability, noise properties, harmonic synchronization, resonance frequencies.

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

For citation. Belski A.Y., Satsyk S.M., Putilin V.N. Analysis of noise characteristics of a diode generator in a multi-circuit system. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 9-16.

Введение

Современное направление развития генераторов на диодах Ганна (ГДГ) связано с освоением высокочастотной части (выше 100 ГГц) миллиметрового диапазона длин волн и, соответственно, разработкой и внедрением в устройства более высокочастотных диодов Ганна на основе новых материалов группы АІІІВV: InP, GaN, SiC и др. Современные ГДГ традиционно используются как гетеродины приемопередающих модулей в верхней области СВЧ- и КВЧ-каналов передачи данных в радиорелейных линиях, а также автодинные и гомодинные модули систем ближней радиолокации с низким уровнем фазовых шумов $-100...-110$ дБ/Гц при отстройках от несущей на 10–100 кГц.

Одно из направлений исследований и практического внедрения состоит в разработке многоконтурных конструкций диодов Ганна миллиметрового диапазона длин волн с низким уровнем шума, повышенной выходной мощностью и КПД.

При анализе работы генераторных устройств в большинстве случаев считается, что генерация возможна только на одной частоте, несмотря на то, что в эквивалентную его схему

могут входить ряд реактивных элементов, а в диапазоне СВЧ эти элементы создают много резонансных частот. В данной работе показывается, как можно обеспечить условия генерации на той или иной частоте и одновременно получить высокую стабильность колебаний.

Цель исследований состоит в выборе типа волны для наиболее эффективных мод колебаний и обеспечении работы различных мод в режиме взаимной синхронизации, которая происходит в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов, что позволяет надеяться на разработку конструктивных решений, обеспечивающих создание высокостабильных малозумящих ГДГ миллиметрового диапазона длин волн с минимальными массогабаритными параметрами.

Теоретический анализ

Простейший генератор может представлять собой отрезок короткозамкнутого прямоугольного волновода, внутри которого установлен диод, вольт-амперная характеристика которого имеет участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Его модернизированная по сравнению с указанной в [1] эквивалентная схема представлена на рис. 1. На этой эквивалентной схеме: G_D и B_D – активная и реактивная проводимости диода, L_D – индуктивность выводов диода, C_{Π} – конструктивная емкость корпуса диода, L_{Π} – индуктивность токоподводящего стержня, B_S и G_S – реактивная и активная проводимости согласованного волновода.

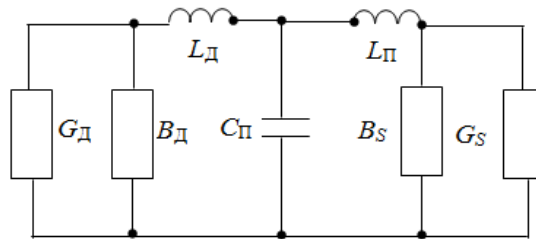


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения генератора
Fig. 1. Equivalent generator replacement scheme

Частота генерации на основном типе колебаний волны H_{101} может быть найдена через габаритные размеры волновода следующим образом:

$$f_{01} = c \sqrt{\frac{1}{l_{01}^2} + \frac{1}{4a^2}}, \quad (1)$$

где l_{01} – эквивалентная длина резонатора, близкая к длине волны в волноводе λ_B ;
 a – ширина волновода;
 c – скорость света.

Как известно, одним из условий генерации является баланс амплитуд

$$G_D + G_S = 0. \quad (2)$$

В последнем уравнении

$$G_S = G_0 \sqrt{1 - \frac{f_k^2}{f_0^2}}, \quad (3)$$

где $G_0 = a/240\pi b$, b – высота волновода;
 f_k – критическая частота волновода.

Баланс фаз определяется следующим выражением:

$$B_D + B_S \operatorname{ctg} \beta l = 0, \quad (4)$$

где B_D – реактивная составляющая проводимости диода;

$\beta=2\pi l/\lambda_{\text{в}}$ – постоянная распространения;

l – длина волноводного резонатора.

При перестройке частоты коротко замыкающим поршнем изменяются условия выполнения не только баланса фаз, но и амплитуд, поэтому требуется одновременное изменение величины напряжения питания, что не всегда возможно. Как показывают исследования, при неизменной величине уровня напряжения источника питания нарушается баланс амплитуд и происходит перескок на другую частоту. Такой перескок происходит чаще всего при приближении частоты генерации к частоте отсечки волновода, так как проводимость G_s , согласно (3), стремится к нулю, и выполнение баланса амплитуд становится невозможным. Новая частота генерации, как показывают расчеты и эксперименты, соответствует типу колебаний H_{102} короткозамкнутого отрезка волновода и поэтому является более высокой и соответствует большей величине проводимости G_s . При этом частоту генерации можно рассчитать, используя следующее выражение:

$$f_{02} = \sqrt{(2c/l_{02})^2 + f_k^2}, \quad (5)$$

где c – скорость света;

l_{02} – длина волноводного резонатора, соответствующая частоте генерации f_{02} .

Однако если с помощью подстроечных элементов конструкции или изменением напряжения питания совместить генерируемую частоту с частотой настройки, определяемой не по типу волны H_{101} , а по типу волны H_{102} , таким образом, что выполняется условие

$$nf_{01} = kf_{02}, \quad (6)$$

то можно, согласно [4], осуществить взаимную синхронизацию обоих сигналов на гармониках. В последнем уравнении n и k – целые числа, показывающие номер гармоники. Например, если $n = 10$, а $k = 9$, то взаимная синхронизация может произойти на частоте 90 ГГц; если $f_{01} = 9,0$, а $f_{02} = 10,0$ ГГц, т. е. на десятой и девятой гармониках соответственно.

Экспериментальные исследования

Исследования проводились в сантиметровом диапазоне длин волн. В генераторную волноводную секцию устанавливались серийные диоды Ганна. Частота генерируемых колебаний, спектр и фазовые шумы наблюдались с помощью анализатора спектра (рис. 2).

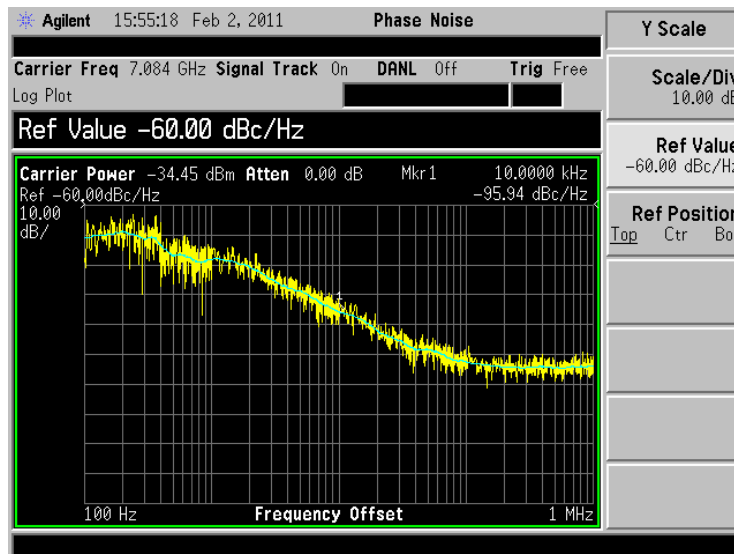


Рис. 2. Фазовые шумы генератора на частоте f_{01}
Fig. 2. Phase noise of the generator at the frequency f_{01}

Наибольший интерес представляли уровни и спектры фазовых шумов, измеренные для двух случаев: для частоты вблизи частоты отсечки волновода ($f_i/f_{01} = 0,90-0,99$) [2, 3] (рис. 2)

и после перескока на более высокую частоту ($f_k/f_{02} = 0,80-0,88$) и подстройки на синхронизируемую гармонику (рис. 3). Видно, что спектры фазовых шумов на небольшом расстоянии от несущей (сотни герц – килоггерцы) отличаются незначительно, а при десятках – сотнях и более их уровень возрастает, что характерно для синхронизируемых генераторов [5, 6]. Взаимная синхронизация происходила на 8-й и 7-й гармониках соответственно, т. е. на частоте около 56 ГГц. Так как в колебательную систему генератора входят такие реактивные элементы, как индуктивность выводов диода и токоподводящего стержня, а также паразитные емкости корпуса диода, то не всегда перескок частоты происходит на тип волны H_{102} и не соответствует выражению (6), т. е. генератор переходит в режим взаимной синхронизации контуров.

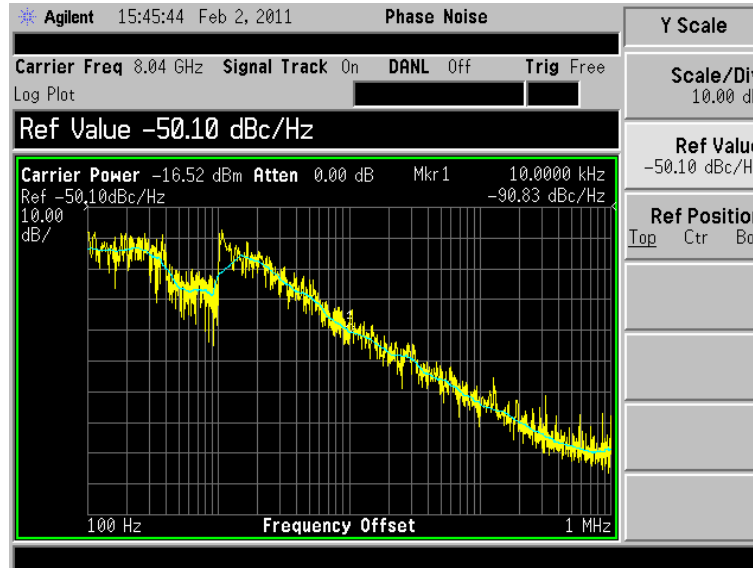


Рис. 3. Фазовые шумы генератора на частоте синхронизации
Fig. 3. Phase noise of the generator at the synchronization frequency

В случае перескока частоты генерации на тип волны H_{102} имела место взаимная синхронизация в очень узком диапазоне частотных (фазовых) шумов (рис. 4, 5), так как взаимная синхронизация происходит на более высоких гармониках: примерно на 10-й и 9-й соответственно, т. е. на частоте около 92 ГГц. Частоты генерации соответствуют выражениям (1) и (5) соответственно.

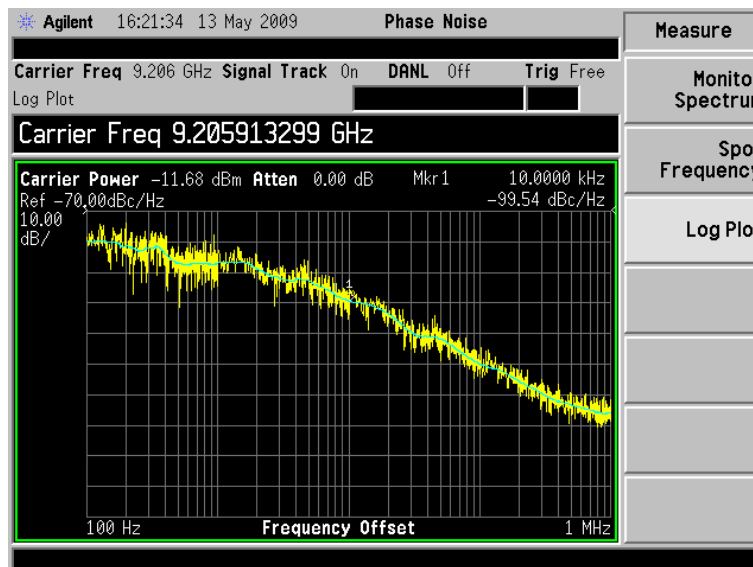


Рис. 4. Фазовые шумы генератора для типа волны H_{101}
Fig. 4. Phase noise of the generator for the H_{101} . wave type

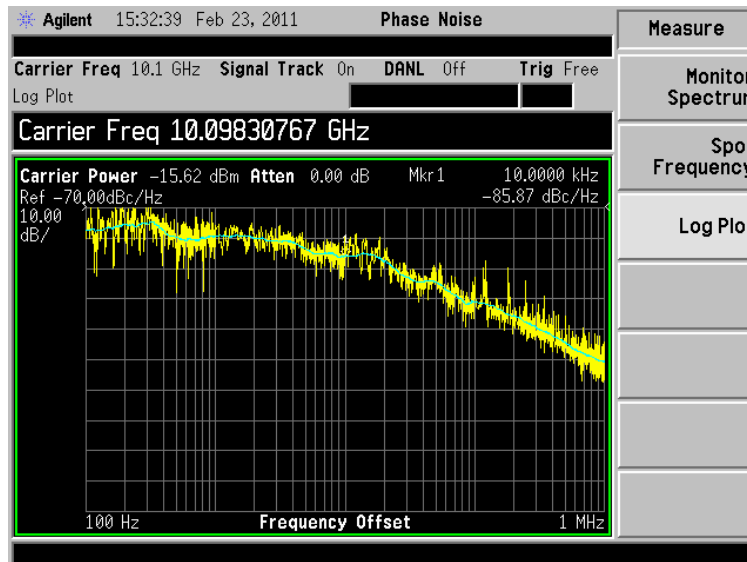


Рис. 5. Фазовые шумы генератора для типа волны H_{102}
Fig. 5. Phase noise of the generator for the H_{102} wave type

Переход с частоты f_{01} на частоту f_{02} можно осуществить, используя цепочку $R_{\Phi}C_{\Phi}$ (рис. 6).

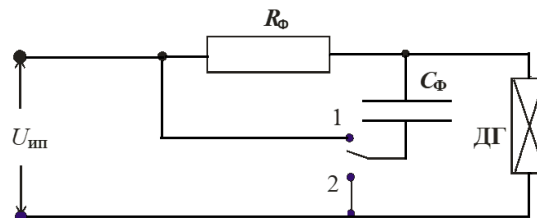


Рис. 6. Схема переключения частот с f_{01} на f_{02}
Fig. 6. Frequency-switching circuit from f_{01} to f_{02}

При нахождении переключателя в положении 1 и подаче напряжения, заранее установленного на источнике питания, форсирующая емкость дает скачок короткого импульса на диоде, что приводит к балансу амплитуд на частоте f_{01} . Если переключатель находится в положении 2, то $R_{\Phi}C_{\Phi}$ цепочка работает как сглаживающий Г-образный фильтр в цепи питания диода и устанавливаются колебания на частоте f_{02} .

Заключение

Исследованы режимы работы диодного генератора в случаях наличия нескольких видов резонансных частот в его колебательной системе. Показано, что наилучшие параметры и шумовые характеристики имели место на наиболее низких типах видов колебаний. Рассчитаны возможные частоты генерации и экспериментально измерены их фазовые шумы. Показана возможность взаимной синхронизации колебаний на высоких гармониках. При исследовании стандартного диода в режиме синхронизации высших гармоник получены уровни фазовых шумов, позволяющие получить практическое преимущество даже по сравнению с СВЧ транзисторами. При этом преимуществами применения ГДГ является также малый уровень амплитудных шумов (примерно минус 120 дБ), простота реализации конструкции генераторов в частотном диапазоне от 1 до 150 ГГц и высокая надежность (50–100 тыс. часов наработки на отказ).

Полученные в работе результаты исследований позволяют оптимизировать параметры генераторно-преобразовательных устройств в качестве генератора либо самогенерирующего смесителя (автодина) в таких востребованных применениях, как измерители скорости движущихся и вращающихся объектов, измерители параметров материалов, системы ближней радиолокации с низким уровнем фазовых шумов $-100\dots-110$ дБ/Гц при отстройках от несущей на 10–100 кГц.

Список литературы

1. Eisenhart R.L., Khan P.J. Some tuning characteristics and oscillation conditions of a waveguide – mounted transferred – electron diode oscillator. *IEEE Trans.* 1972; ED-19(9).
2. Муравьев В.В., Савельев В.Я., Бельский А.Я. Возможность значительного повышения стабильности частоты генераторов на диодах с отрицательным сопротивлением. *Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника.* 1974;17(8):88-90.
3. Бельский А.Я., Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Особенности расчета шумовых характеристик генераторов, стабилизированных дисперсионным резонатором. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук.* 2011;3:107-110.
4. Уткин Г.М. *Автоколебательные системы и волновые усилители.* Москва: Сов. радио; 1978.
5. Бельский А.Я. Дробот С.В., Зацепин Е.Н. Некоторые особенности характеристик внешней синхронизации твердотельных генераторов. *Доклады БГУИР.* 2013;7(77):19-24.
6. Новоженин В.М. Исследование флюктуаций частоты генератора Ганна. *Известия ВУЗов СССР. Радиоэлектроника.* 1980;10:26-29.

References

1. Eisenhart R.L., Khan P.J. Some tuning characteristics and oscillation conditions of a waveguide – mounted transferred – electron diode oscillator. *IEEE Trans.* 1972;19(9).
2. Muravev VV, Saveliyev V.Ya., Belsky A.Ya. [The possibility of a significant increase in the frequency stability of oscillators on diodes with a negative resistance]. *Izvestiya VUZov SSSR. Radioelektronika = Proceedings of the USSR Universities. Radio electronics.* 1974;17(8):88-90. (In Russ.)
3. Belski A.Ya., Drobot S.V., Zatsypin E.N. [Features of the calculation of the noise characteristics of oscillators stabilized by a dispersive resonator]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the NAS of Belarus. Physical-technical series.* 2011;3:107-110. (In Russ.)
4. Utkin G.M. [*Auto-oscillatory systems and wave amplifiers*]. Moscow: Sov. radio; 1978. (In Russ.)
5. Belski A.Ya., Drobot S.V., Zatsypin E.N. [Some features of the characteristics of external synchronization of solid-generators]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2013;7(77):19-24. (In Russ.)
6. Novozhenin V.M. [The study of fluctuations in the frequency of the Gunn generator]. *Izvestiya VUZov SSSR. Radioelektronika = Proceedings of the USSR Universities. Radio electronics.* 1980;10:26-29. (In Russ.)

Вклад авторов

Бельский А.Я. разработал методики исследований, принял участие в проведении исследований.

Сацук С.М. выполнил анализ и обобщение результатов.

Путилин В.Н. осуществил технический контроль и интерпретацию результатов исследований.

Authors' contribution

Belski A.Ya. developed research techniques and participated in research.

Satsuk S.M. performed an analysis and synthesis of the results.

Putilin V.N. carried out technical control and interpretation of research results.

Сведения об авторах

Бельский А.Я., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Сацук С.М., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Путилин В.Н., к.т.н., доцент кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Belski A.Y., PhD, Associate Professor of the Electronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Satsuk S.M., PhD, Associate Professor of the Electronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Putilin V.N., PhD, Associate Professor of the Electronics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-10;
e-mail: satsuk@bsuir.by
Сацук Сергей Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-86-10;
e-mail: satsuk@bsuir.by
Satsuk Sergei Michailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-17-25>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.592; 544.653

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ЦИНКА И МЕДИ

ТКАЧЁНОК Н.М., ЧУБЕНКО Е.Б., БОНДАРЕНКО В.П.

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

Поступила в редакцию 11 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Методом электрохимического осаждения на подложках из монокристаллического кремния получены структуры на основе ZnO и Cu, представляющие собой поликристаллический композит, состоящий из кристаллического ZnO с кристаллографической ориентацией (002) и (101), легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. При исследовании полученных пленок методом рамановской спектроскопии было подтверждено образование кристаллического ZnO. Было получено, что на спектрах комбинационного рассеяния всех образцов присутствует полоса с максимумом, относящаяся к колебательной моде ZnO $2A_1(LO)$. Также на спектрах каждого из образцов присутствует полоса в области 649 см^{-1} , не связанная с колебательными модами решетки собственного кристаллического ZnO. Показано, что при увеличении плотности тока осаждения в диапазоне $2\text{--}10\text{ мА/см}^2$ концентрация Cu в материале снижается, при этом уменьшается количество кластеров Cu, но возрастает степень легирования ZnO ионами Cu. Композиты на основе ZnO демонстрируют широкую полосу фотолюминесценции в диапазоне длин волн $500\text{--}700\text{ нм}$, связанную с наличием вакансий и междоузельных атомов кислорода в кристаллической решетке. При плотности тока осаждения 5 мА/см^2 наблюдается коротковолновый сдвиг полосы фотолюминесценции, обусловленный легированием Cu, так как в запрещенной зоне создаются примесные уровни, связанные с присутствием Cu в пленках ZnO. Наблюдалось изменение интенсивности излучения при плотности тока 10 мА/см^2 , что обусловлено большей толщиной полученных пленок. Результаты исследования могут быть использованы при разработке технологии изготовления оптоэлектронных и фотовольтаических приборов, фотокаталитических покрытий на основе ZnO.

Ключевые слова: электрохимическое осаждение, нанокompозитные материалы, рентгеновская дифрактометрия, рамановская спектроскопия, фотолюминесценция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках задания 2.1.02 ГПНИ Республики Беларусь «Фотоника, опто- и микроэлектроника», задания 2.21 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии». Авторы выражают благодарность Д.В. Жигулину за проведение растровой электронной микроскопии и ЭДР-спектроскопии образцов.

Для цитирования. Ткачёнок Н.М., Чубенко Е.Б., Бондаренко В.П. Формирование электрохимическим методом композитных материалов на основе оксида цинка и меди. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 17-25.

ELECTROCHEMICAL FORMING OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ZINC AND COPPER OXIDE

NIKITA M. TKACHYONOK, EUGENE B. CHUBENKO, VITALY P. BONDARENKO

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

Submitted 11 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Structures based on ZnO and Cu, which are a polycrystalline composite consisting of crystalline ZnO with a crystallographic orientation of (002) and (101) doped with Cu and crystalline metallic Cu, were obtained by electrochemical deposition on substrates of single crystal origin. In the study of the obtained films by Raman spectroscopy, the forming of crystalline ZnO was confirmed. ZnO $2A_1$ (LO), also in the spectra of each of the bands present in the 649 cm^{-1} region, not related to the vibrating lattice modes of the intrinsic crystalline ZnO. It was shown that with an increase in the deposition current density in the range of $2\text{--}10\text{ mA/cm}^2$, the concentration of Cu in the material weakens, while the number of Cu clusters decreases, but the degree of doping of ZnO with Cu ions increases. ZnO-based composites exhibit a broad photoluminescence band in the long wavelength range of $500\text{--}700\text{ nm}$, related with vacancies and interstitial oxygen atoms in the crystal lattice. At a current density of 5 mA/cm^2 , short-wavelength shifts of the photoluminescence bands are observed, due to the doping of Cu, since impurity levels are created in the band gap associated with the presence of Cu in ZnO films. A change in the radiation intensities was observed at a current density of 10 mA/cm^2 , which is due to the greater thickness of the obtained films. The results can be used to develop the manufacturing technology of optoelectronic and photovoltaic devices, photocatalytic coatings based on ZnO.

Keywords: electrochemical deposition, nanocomposite materials, X-ray diffractometry, Raman spectroscopy, photoluminescence.

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

Acknowledgments. This work was carried out in the framework of assignment 2.1.02 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Photonics, Optoelectronics and Microelectronics”, assignment 2.21 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”. The authors also thank D.V. Zhigulin for conducting scanning electron microscopy and EDR spectroscopy of samples.

For citation. Tkachyonok N.M., Chubenko E.B., Bondarenko V.P. Electrochemical forming of composite materials based on zinc and copper oxide. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 17-25.

Введение

Оксид цинка (ZnO) представляет собой уникальный материал, сочетающий в себе множество разнообразных свойств. Он является прямозонным полупроводником с большой шириной запрещенной зоны, равной $3,37\text{ эВ}$ при 300 K [1]. Энергия связи экситонов в ZnO (60 мэВ) [1] значительно выше, чем в других широзонных полупроводниках, таких как CdS (30 мэВ) [2] или GaN (25 эВ) [3]. ZnO обладает коэффициентом пропускания в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах не менее 80% , проявляет пьезоэлектрические и фотокаталитические свойства [4]. Благодаря необычному их сочетанию в одном материале, ZnO широко используется в форме наночастиц, тонких пленок и массивов наноструктур в оптоэлектронных и светоизлучающих устройствах, фотокаталитических покрытиях, фотовольтаических приборах и «прозрачной» электронике [5].

Легирование ZnO определенными химическими элементами позволяет управлять его оптическими и электрофизическими свойствами [4]. Такой подход является более предпочтительным при оптимизации оптических свойств ZnO. Известно, что металлы группы IB – серебро (Ag) и медь (Cu) – являются быстродиффундирующими примесями

в полупроводниковых соединениях. Диффузия Cu в ZnO приводит к изменению структуры его кристаллической решетки и, соответственно, его физических свойств. Среди других элементов группы IB Cu хорошо подходит в качестве легирующей примеси для повышения эффективности люминесценции, смещая пик фотолюминесценции в синюю область, что было показано в работе [6]. ZnO может быть получен большим количеством лабораторных и промышленных методов: магнетронным распылением [7, 8], молекулярно-лучевой эпитаксией [9], импульсным лазерным осаждением [10], химическим и электрохимическим осаждением [11]. Метод электрохимического осаждения привлекателен низкой стоимостью и технологической простотой реализации. Этот метод применим для осаждения металлов и их оксидов, в том числе и ZnO. Он позволяет совместно осаждать из одного раствора несколько материалов и, регулируя концентрацию исходных реагентов, управлять степенью легирования или составом получаемых структур. Изменяя плотность тока, концентрацию реагентов в растворе, температуру и pH, можно контролировать структуру осаждаемого материала, его состав и физические свойства.

Получение тонкопленочных гетероструктур и композитных материалов на их основе простыми низкотемпературными методами является важной задачей для создания технологии изготовления фотокаталитических покрытий, фотовольтаических и оптоэлектронных приборов. В этой связи в данной работе были проведены исследования закономерностей формирования электрохимическим методом композитных материалов на основе пленок ZnO и Cu из водных растворов электролита.

Методика эксперимента

Для формирования композитных материалов на основе ZnO и Cu в качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния электронного типа проводимости, легированного сурьмой марки КЭС с удельным сопротивлением 0,01 Ом·см и кристаллографической ориентацией (111). Поверхность подложек предварительно очищалась в насыщенном растворе оксида хрома (VI), в концентрированной серной кислоте и 4,5 % растворе плавиковой кислоты. Затем подготовленная подложка помещалась в водный раствор электролита, содержащий нитрат цинка $Zn(NO_3)_2$ и сульфат меди $CuSO_4$ в концентрации 0,1 М и 1 мМ соответственно. Раствор в процессе осаждения нагревался до температуры 80 °С. Осаждение полупроводникового соединения осуществлялось в гальваностатическом режиме при катодной поляризации при плотности тока 2–10 мА/см² в течение 5 мин. Процесс проводился в стандартной двухэлектродной ячейке. В качестве вспомогательного электрода использовалась платиновая спираль, располагавшаяся напротив подложки на достаточном удалении от нее для равномерного распределения силовых линий тока.

Структура образцов ZnO была исследована методом растровой электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-4800. Элементный состав исследовался методом энергодисперсионной рентгеновской (ЭДР) спектроскопии с помощью ЭДР-спектрометра Bruker QUANTAX 200. Спектры фотолюминесценции были записаны при помощи измерительного комплекса на основе монохроматора-спектрографа Solar TII MS 7504i, оснащенного охлаждаемой элементом Пельтье цифровой камерой с ПЗС-матрицей Hamamatsu S7031-1006S. Для возбуждения фотолюминесценции использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт. Монохроматические линии из широкого спектра лампы выделялись при помощи двойного монохроматора Solar TII DM 160. Во всех экспериментах длина волны возбуждающего света составляла 345 нм. Спектры комбинационного рассеяния образцов были исследованы на сканирующем лазерном конфокальном рамановском микроскопе SOL Instruments Confotec NR500 с использованием лазера Cobolt Blues 25 DPSS с рабочей длиной волны 473 нм. Все оптические измерения проводились при комнатной температуре ~20 °С.

Результаты экспериментов

На рис. 1 приведены электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола полученных композитных материалов на основе ZnO и Cu. Осажденные полупроводниковые пленки состоят из двух слоев, между которыми видна хорошо различимая на фотографиях граница. Верхний слой состоит из массива пластинчатых кристаллов. При возрастании плотности тока осаждения их размер постепенно увеличивается от 2 мкм при 2 мА/см² до 4 мкм при 5 мА/см² и до 7,5 мкм при 10 мА/см². Нижний сплошной слой виден только на сколе образцов, полученных при плотности тока 5 и 10 мА/см². На образце, соответствующем 2 мА/см², данный слой отсутствует. Суммарная толщина полученных пленок увеличивается в соответствии с электрохимическим законом Фарадея пропорционально плотности тока и составляет 2,14, 4,14 и 5,97 мкм при 2, 5 и 10 мА/см² соответственно. Также с увеличением плотности тока возрастает и толщина плотного нижнего слоя композитного материала, от 0,754 мкм при плотности тока 5 мА/см² до 1,05 мкм при 10 мА/см². При этом разница плотности тока составляет 50 %, а толщины составляют разницу в 28 %, что обусловлено протеканием побочных реакций в процессе осаждения, например, связанных с выделением H₂.

По данным ЭДР-спектроскопии, сформированные электрохимическим методом композитные пленки ZnO с Cu содержат приблизительно 66 ат.% кислорода (O) и 31 ат.% цинка (Zn). Это отклонение от стехиометрического соотношения компонентов в ZnO (C_O/C_{Zn} = 50/50 ат.%) говорит о наличии пероксида цинка (ZnO₂) или гидроксида цинка (Zn(OH)₂) в их составе. В зависимости от плотности тока изменяется и процент содержания Cu: 3 ат.% при 2 мА/см², 1,74 % при 5 мА/см² и 1 ат.% при 10 мА/см².

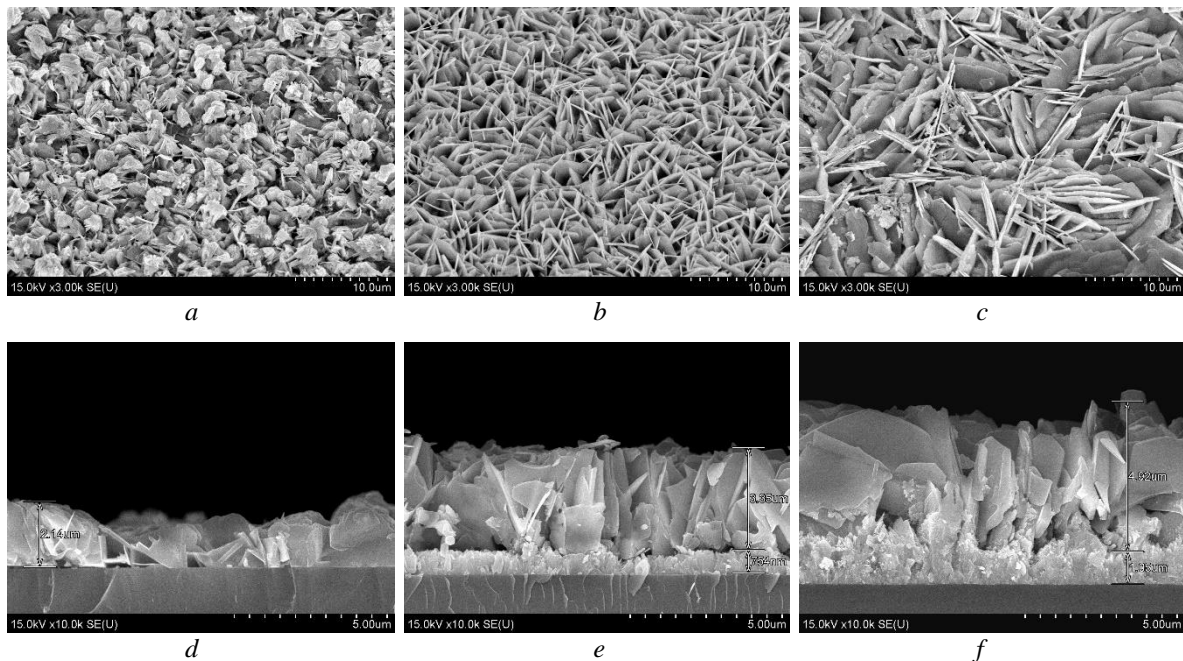


Рис. 1. Электронные микрофотографии поверхности и поперечного скола композитных материалов на основе ZnO и Cu, сформированных при плотности тока 2 (a, d), 5 (b, e), 10 мА/см² (c, f)

Fig. 1. Electron micrographs of the surface and transverse cleavage of composite materials based on ZnO and Cu formed at a current density of 2 (a, d), 5 (b, e), 10 mA/cm² (c, f)

По данным рентгеновской дифрактометрии, полученные композиты независимо от плотности тока осаждения состоят из кристаллитов ZnO с кристаллографической ориентацией (002) и (101) (рис. 2), а также небольшой концентрации кристаллитов ZnO с широким набором других ориентаций. Также на рентгенограмме присутствуют линии, соответствующие кристаллическим фазам Cu с кристаллографической ориентацией (111), (200), (220) и (311).

При исследовании полученных пленок методом рамановской спектроскопии было подтверждено образование кристаллического ZnO. На рис. 3, a видно, что на спектрах комбинационного рассеяния всех образцов присутствует полоса с максимумом около 1039 см⁻¹,

относящаяся к колебательной моде ZnO $2A_1(LO)$, и соответствующая волновому числу 442 см^{-1} полоса, связанная с модой ZnO E_2^{high} [12]. На спектре комбинационного рассеяния образца, полученного при плотности тока 2 мА/см^2 , присутствует также ряд полос, соответствующих другим колебательным модам ZnO: полоса с максимумом, расположенным около 324 см^{-1} , соответствующая моде $E_1^{high}-E_1^{low}$, полоса на 568 см^{-1} , связанная с модой $A_1(LO)$, и полоса 1122 см^{-1} , обусловленная модой $2LO$ [12]. Также на спектрах каждого из образцов присутствует полоса в области 649 см^{-1} , не связанная с колебательными модами решетки собственного кристаллического ZnO.

На спектрах фотолюминесценции (рис. 3, *b*) образцов композитных материалов на основе ZnO и Cu выделяется одна широкая полоса с максимумом в желто-оранжевом диапазоне спектра. Для образцов, полученных при плотности тока 2 и 10 мА/см^2 , положение ее максимума практически совпадает и приходится на длину волны 593 нм . На образце, полученном при плотности тока 5 мА/см^2 , максимум сдвигается в зеленую область, на длину волны 566 нм .

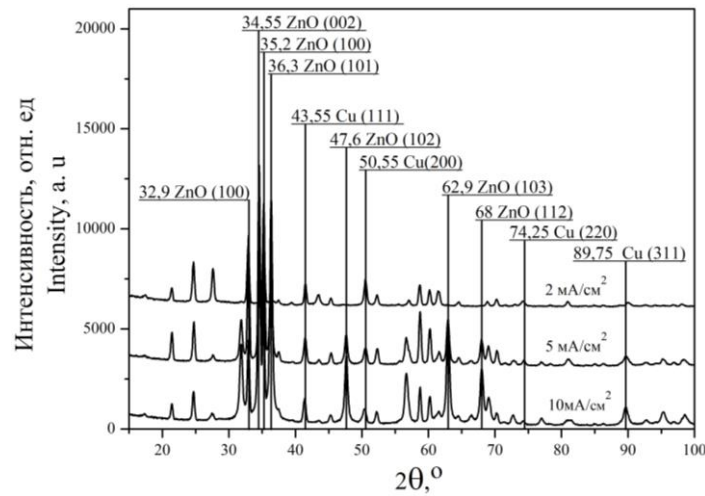


Рис. 2. Рентгенограммы композитных материалов на основе ZnO и Cu, полученных при различной плотности тока осаждения

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of composite materials based on ZnO and Cu obtained at different deposition current densities

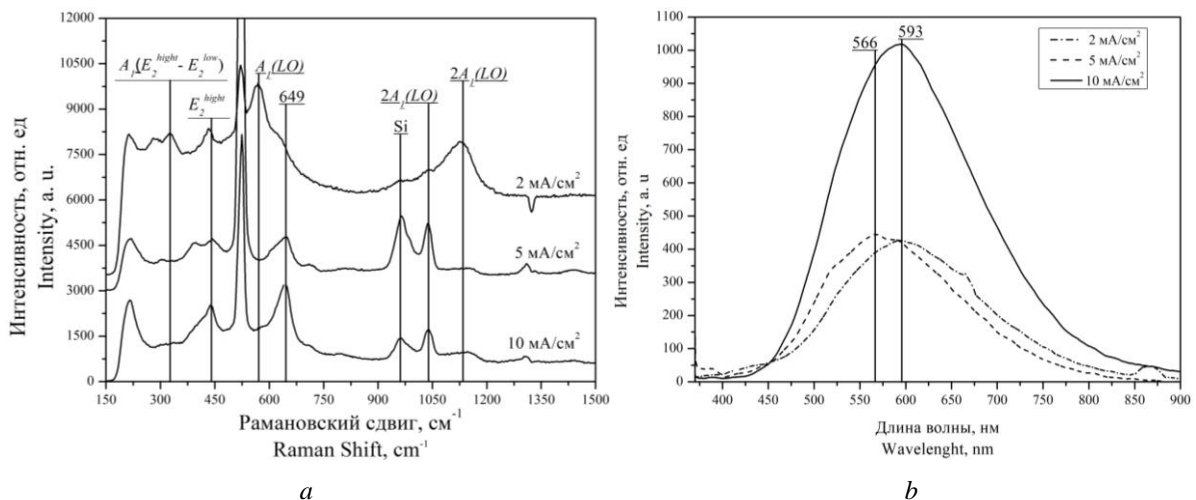


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния (*a*) и спектры фотолюминесценции (*b*) композитных материалов на основе ZnO и Cu, полученных при различной плотности тока осаждения

Fig. 3. Raman spectra (*a*) and photoluminescence spectra (*b*) of composite materials based on ZnO and Cu obtained at different deposition current densities

Обсуждение результатов

Наблюдаемое на микрофотографиях поперечного скола образцов формирование нижнего плотного слоя ZnO при увеличении плотности тока характерно для электрохимического метода осаждения [13], так как при больших плотностях тока увеличивается концентрация центров зарождения на поверхности кремниевой подложки. Рост отдельных пластинчатых кристаллов при низкой плотности тока осаждения 2 mA/cm^2 также связан с малой плотностью центров зарождения зародышей на поверхности подложки. Переход от роста сплошной пленки к формированию отдельных кристаллов происходит при использовании больших плотностей тока из-за увеличения концентрации структурных дефектов по мере увеличения толщины формируемой пленки ZnO.

Результаты исследования образцов, полученные методом рентгеновской дифрактометрии, показывают, что осажденный электрохимическим методом материал представляет собой поликристаллический ZnO, в который включены кластеры металлической Cu. Линия с максимумом на 649 cm^{-1} , наблюдаемая на спектрах комбинационного рассеяния, не связана с собственным кристаллическим ZnO, поэтому может быть обусловлена легированием ZnO ионами Cu^{2+} . Так как ионный радиус Cu^{2+} (77 пм) больше, чем ионный радиус Zn^{2+} (74 пм) [14], то в том случае, когда ионы Cu занимают места в узлах и междоузлиях кристаллической решетки, изменяется длина связей между атомами, вследствие чего происходит изменение энергии колебательных мод [15]. Поэтому полученный материал является поликристаллическим композитом, состоящим из ZnO, легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. Спектры фотолюминесценции полученных композитов обусловлены процессами излучательной рекомбинации через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанные с дефектами или примесями [1]. ZnO обычно содержит различные дефекты кристаллической решетки, обусловленные вакансиями кислорода (V_{O}) или цинка (V_{Zn}), а также междоузельными атомами кислорода (O_i), цинка (Zn_i) или водорода (H_i). Для структур, полученных электрохимическим методом, наиболее характерны дефекты, связанные с вакансиями кислорода и кислородом в междоузлиях.

Широкая полоса фотолюминесценции, наблюдаемая на образцах композитных материалов на основе ZnO и Cu, обусловлена как излучательными переходами через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанными с дефектами, представляющими собой вакансии кислорода в узлах кристаллической решетки широкозонного полупроводника V_{O} , так и междоузельными атомами кислорода O_i (рис. 4). Наличие примесных уровней в запрещенной зоне, связанных с присутствием Cu в пленках ZnO, приводит к сдвигу максимума фотолюминесценции в коротковолновую область [1]. Такой сдвиг отмечается на образце, полученном при плотности тока 5 mA/cm^2 .

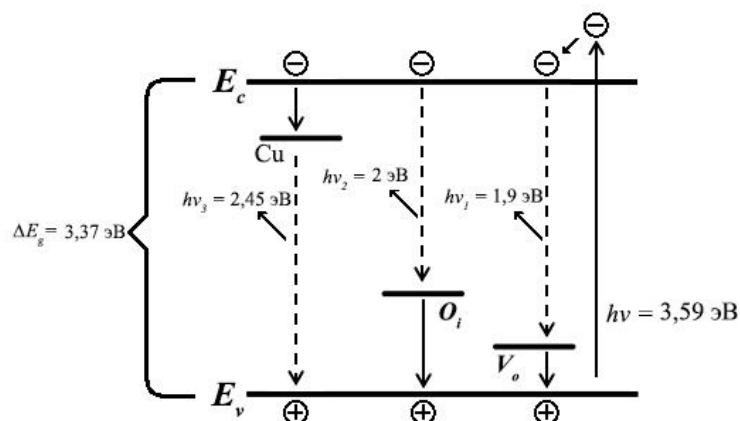


Рис.4. Схематическое изображение излучательных и безызлучательных переходов в ZnO (с использованием данных из [1, 5])

Fig. 4. Schematic representation of radiative and nonradiative transitions in ZnO (using data from [1, 5])

Результаты ЭДР-спектроскопии показывают, что концентрация Cu в композитном материале уменьшается с возрастанием плотности тока осаждения, поэтому можно было бы

ожидать, что максимальный коротковолновый сдвиг фотолюминесценции должен наблюдаться в структурах, полученных при минимальной использованной плотности тока 2 mA/cm^2 . Однако при повышении плотности тока осаждения до 5 mA/cm^2 происходит изменение структуры и состава композитов. На спектрах комбинационного рассеяния появляется полоса с максимумом на 649 cm^{-1} , связанная с легированием ZnO ионами Cu^{2+} , и одновременно исчезает ряд линий, соответствующих колебательным модам ZnO: $E_1^{\text{high}}-E_1^{\text{low}}$, $A_1(\text{LO})$ и 2LO . То есть в структурах, полученных при низкой плотности тока, Cu находится в составе металлических кластеров. При возрастании плотности тока осаждения степень легирования ZnO ионами Cu увеличивается, и концентрация кластеров металлической Cu уменьшается. При дальнейшем росте плотности тока до 10 mA/cm^2 концентрация Cu в пленке продолжает снижаться, и влияние легирующей примеси Cu на положение максимума суммарной полосы фотолюминесценции уменьшается. Поэтому интенсивность фотолюминесценции композитного материала, полученного электрохимическим осаждением при 10 mA/cm^2 , возрастает за счет снижения количества кластеров меди и путей безызлучательной рекомбинации, но спектральное положение пика уже в первую очередь определяется собственными дефектами полупроводника.

Заключение

Методом электрохимического осаждения на подложках из монокристаллического кремния получены структуры на основе ZnO и Cu, представляющие собой поликристаллический композит, состоящий из ZnO, легированного Cu, и кристаллитов металлической Cu. Основной компонентой полученного материала является поликристаллический ZnO, включающий множества фаз, наиболее выраженными из которых являются (101) и (002). Показано, что концентрация меди уменьшается с 3 до 1 ат.% при увеличении плотности тока осаждения от 2 до 10 mA/cm^2 . При возрастании плотности тока также меняется морфология пленок – за счет увеличения центров зарождения на поверхности кремниевой подложки формируется сплошной слой композитного материала, на поверхности которого образуются пластинчатые кристаллы. При большей плотности тока толщина сплошного слоя увеличивается. Изменение спектров комбинационного рассеяния при возрастании плотности тока осаждения $\geq 5 \text{ mA/cm}^2$ свидетельствует об изменении энергии колебательных мод в материале, указывающих на встраивание ионов Cu в кристаллическую решетку ZnO. Максимальное влияние легирования ZnO ионами Cu на оптические свойства отмечено в материалах, полученных при плотности тока 5 mA/cm^2 . Максимум полосы фотолюминесценции в оптическом диапазоне в этом случае сдвигается в более коротковолновую область, с 593 нм на длину волны 566 нм. При иных значениях плотности тока осаждения положение максимума полосы фотолюминесценции определяется рекомбинационными процессами через уровни в запрещенной зоне полупроводника, связанными с вакансиями кислорода в узлах кристаллической решетки ZnO и междоузельными атомами кислорода.

Полученные результаты могут представлять интерес для разработки технологии изготовления оптоэлектронных и фотовольтаических приборов, а также фотокаталитических покрытий на основе модифицированного ZnO.

Список литературы / References

1. Özgür Ü., Alivov Ya.I., Liu C., Teke A., Reshchikov M.A., Dogan S., Avrutin V., Cho S.J., Morkoc H. Comprehensive review of ZnO materials and devices. *J. Appl. Phys.* 2005;98:1 103. DOI:10.1063/1.1992666.
2. Покутний С.И. Энергия связи экситона в полупроводниковых квантовых точках. *Физика и техника полупроводников.* 2010;4:508-512. Pokutny S.I. [Exciton binding energy in semiconductor quantum dots]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov.* 2009;44:508-512. (In Russ.)
3. Johnson C., Choi Heon-Jin, Knutsen P., Richard D., Yang Peidong, Richard J. Single gallium nitride nanowire lasers. *Nat. Mater.* 2002;1:106-110. DOI:10.1038/nmat728.
4. J. Yu, X. Yu. Hydrothermal synthesis and photocatalytic activity of zinc oxide hollow spheres. *Environ. Sci. Technol.* 2008;42:4902-4907. DOI:10.1021/es800036n.

5. Kaviyarasu K., Maria Magdalane C., Kanimozhi K., Kennedy J., Siddhardha B., Subba Reddy E., Rotte N.K., Sharma C.S., Therma F.T., Letsholathebe D., Mola G.T., Maaza M. Elucidation of photocatalysis, photoluminescence and antibacterial studies of ZnO thin films by spin coating method. *J. Photochem. Photobiol.* 2017;173:466-475. DOI:10.1016/j.jphotobiol.2017.06.026.
6. Zhang Z., Yi J.B., Ding J., Wong L.M., Seng H.L., Wang S.J., Tao J.G., Li G.P., Xing G.Z., Sum T.C., Alfred Huan C.H., Wu T. Cu-Doped ZnO nanoneedles and nanonails: morphological evolution and physical properties. *J. Phys. Chem.* 2008;122:9579-9585. DOI:10.1021/jp710837h.
7. Kasuga M., Mochizuki M. Orientation relationships of zinc oxide on sapphire in heteroepitaxial chemical vapor deposition. *J. Cryst. Growth.* 1981;185-194. DOI:10.1016/0022-0248(81)90459-0.
8. Srikant V., Sergio V., Clarke D.R. Epitaxial aluminum-doped zinc oxide thin films on sapphire: i, effect of substrate orientation. *Appl. Phys. Lett.* 1995;54:1931-1934. DOI:10.1111/j.1151-2916.1995.tb08912.x.
9. Izyumskaya N., Avrutin V., Wladimir S., El-Shaer A., Reub F., Gruber Th., Waag A. Molecular beam epitaxy of high-quality ZnO using hydrogen peroxide as an oxidant. *J. Cryst. Growth.* 2004;269:356-361. DOI:10.1016/j.jcrysgr.2004.04.120.
10. Tsukazaki A., Ohtomo A., Onuma T., Ohtani M., Makino T., Sumiya M., Ohtani K., Chichibu S.F., Fuke S., Segawa Y., Ohno H., Koinuma H., Kawasaki M. Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO. *Nat. Mater.* 2004;4:42-46. DOI:10.1038/nmat1284.
11. Xu L., Guo Y., Liao Q., Zhang J., Xu D. Morphological control of ZnO nanostructures by electrodeposition. *J. Phys. Chem.* 2005;109:13519-13522. DOI:10.1021/jp051007b.
12. Cuscó R., Alarcón-Lladó E., Ibáñez J., Artús L., Jiménez J., Wang B. Temperature dependence of Raman scattering in ZnO. *Physical Review.* 2007;75:1-11. DOI:10.1103/PhysRevB.75.165202.
13. Chubenko E.B., Klyshko A.A., Bondarenko V.P., Balucani M. Electrochemical deposition of zinc oxide on a thin nickel buffer layer on silicon substrates. *Electrochim. Acta.* 2011;56:4031-4036. DOI:10.1016/j.electacta.2011.02.008.
14. Michael W.E., Norman H., Tyler B.C., John K.B., Michael B., Willi A.B. Atomic weights of the elements. *Pure Appl. Chem.* 2013;85:1047-1078. DOI:10.1351/PAC-REP-13-03-02.
15. Cong C.J., Liao L., Liu Q.Y., Li J.C., Zhan K.L. Effects of temperature on the ferromagnetism of Mn-doped ZnO nanoparticles and Mn-related Raman vibratio. *Nanotechnology.* 2006;17:1520-1526. DOI:10.1088/0957-4484/17/5/059.

Вклад авторов

Ткачёнук Н.М. выполнил изготовление пленок на основе оксида цинка, а также провел сравнительный анализ спектров фотолюминесцентного излучения и структуры.

Чубенко Е.Б. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принял участие в интерпретации их результатов.

Бондаренко В.П. принял участие в интерпретации результатов исследований.

Authors' contribution

Tkachyonok N.M. made films based on zinc oxide, and also performed a comparative analysis of the spectra of photoluminescent radiation and structure.

Chubenko E.B. identified the tasks that needed to be solved during the research, and also took part in the interpretation of their results.

Bondarenko V.P. took part in the interpretation of their results.

Сведения об авторах

Ткачёнук Н.М., инженер-электроник НИЛ 4.3 НИЧ БГУИР, магистрант кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е.Б., к.т.н., ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tkachyonok N.M., electronic engineer R&D Laboratory 4.3 BSUIR, undergraduate of the Department of Micro and Nanoelectronics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E.B., PhD, Leading Researcher R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, Associate Professor, Head of R&D Laboratory 4.3 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Беларуский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-293-88-54;
e-mail: fransresto@gmail.com
Ткаченок Никита Михайлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. + 375-29-293-88-54;
e-mail: fransresto@gmail.com
Tkachyonok Nikita Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-26-34>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621

КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ОБОРУДОВАНИЯ

КЕЧИК Д.А.

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

Поступила в редакцию 27 декабря 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы – разработка метода повышения достоверности виброакустической диагностики промышленного оборудования, работающего в различных скоростных режимах. Получена выборка сигналов виброускорения, снятых с корпуса испытательного стенда при его работе с изменяющейся скоростью. Обосновано предварительное разделение вибросигнала на три частотных диапазона. Оценены зависимости мощности вибрации от скорости вращения приводного вала в различных частотных областях. Предложен алгоритм компенсации изменения мгновенной мощности вибросигнала при меняющейся скорости работы оборудования. Алгоритм основан на использовании эмпирических зависимостей мощности вибросигнала в указанных диапазонах от скорости вала, полученных усреднением по ансамблю сигналов. Для оценки изменения мощности сигналов используется их вычисленное в скользящем временном окне среднеквадратическое значение. Оценивается среднее по ансамблю сигналов относительное изменение мощности вибросигнала в каждом диапазоне частот при отклонении скорости от ее выбранного значения. Мгновенные значения сигналов в каждом диапазоне частот делятся на рассчитанные отношения. Таким образом компенсируются только изменения мощности, вызванные изменением скорости оборудования. Изменения, вызванные развитием дефекта оборудования, сохраняются. Результирующий сигнал, подлежащий дальнейшему анализу, получается сложением обработанных сигналов в трех частотных областях. Показано, что компенсация изменения мощности снижает разброс параметров вибросигнала, используемых для оценки технического состояния оборудования. Таким образом, качество работы системы виброакустической диагностики улучшается, если предварительно компенсировать изменение мощности вибросигналов, обусловленное изменением скорости оборудования. Качество работы алгоритма проверялось на таких статистических параметрах вибрации, как среднеквадратическое значение и пик-фактор вибросигнала.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, диагностика оборудования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кечик Д.А. Компенсация изменения мощности виброакустического сигнала при изменении скоростного режима оборудования. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 26-34.

COMPENSATION FOR VIBRATION SIGNAL POWER VARIANCE WHEN CHANGING EQUIPMENT SPEED MODE

DANIIL A. KECHIK

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

Submitted 27 December 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of this paper is to develop a method to enhance reliability of vibrational diagnosing of variable-speed industrial equipment. A dataset of vibration acceleration signals, picked up at the variable-speed test stand, has been obtained. Preliminary splitting of a vibration signal into three frequency ranges has been proved to be necessary. Vibration power dependencies on the main shaft speed have been estimated in different frequency ranges. The paper proposes an algorithm compensating variations of instantaneous power of vibration signal where equipment operation speed varies. It is based on the use of empirical dependencies of vibration signal power on shaft speed, which were derived by ensemble averaging of preliminarily split signals. A root mean square (RMS) value calculated in a sliding window is used to estimate variation of signal power. For signals within each frequency range, ensemble-averaged relative power variation produced by speed deviation is to be estimated. Instantaneous values of signals in each frequency range are to be divided by relations estimated as above. Thus, only power variations caused by variable speed are compensated. Variations caused by defect evolution are preserved. The resulting signal to be further analysed is derived by summation of processed signals in three frequency ranges. Power variation compensation decreases dispersion of parameters of signal that are used for estimation of equipment state. Preliminary compensation of vibration power variation caused by variable operation speed has proved to be effective for improving vibrational diagnostic system results. The proposed algorithm was validated on such statistical parameters of vibration as RMS and peak-factor of vibration signal.

Keywords: vibration-based diagnostics, digital signal processing, equipment diagnostics.

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

For citation. Kechik D.A. Compensation for vibration signal power variance when changing equipment speed mode. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 26-34.

Введение

Наиболее простым способом получения информации об общем состоянии оборудования является анализ статистических характеристик сигнала его вибрации. Данный подход не предназначен для определения конкретной неисправности оборудования, однако при его использовании возможно оценить состояние машины в случаях, когда неисправность не удастся выявить частотными или частотно-временными методами [1]. Также целесообразно анализировать их тренды для оценки общего состояния машины [2, 3].

Среднеквадратическое значение (СКЗ) вибросигнала характеризует мощность вибрации машины. В отличие от среднего арифметического значения, СКЗ не зависит от фазового смещения составляющих сигнала и допускает сравнение как гармонических, так и сложных колебательных процессов по мощности [4].

Пик-фактор показывает отношение пикового значения сигнала и среднеквадратического. Данный метод указывает на наличие в сигнале импульсов, обусловленных ударными процессами. Как правило, значение пик-фактора лежит в пределах 3...4 для шумовой вибрации, для выраженных импульсов, даже если они редкие, превышает 20...30 [5]. По мере развития дефекта и увеличения амплитуды ударных импульсов пик-фактор возрастает. Однако при дальнейшей деградации оборудования уровень широкополосной вибрации также поднимется, что ведет к снижению пик-фактора [6].

Показатели вибросигналов исправного оборудования колеблются около постоянного значения, которое зависит от его мощности, способа крепления датчика, режима работы. Существующие стандарты устанавливают значения пик-фактора и СКЗ вибросигналов, характеризующие различные степени износа оборудования для его различных типов [7]. Отслеживание трендов статистических показателей позволяет повысить достоверность результатов диагностики и выявлять зарождающиеся неисправности [2, 3].

В настоящей работе предложен метод повышения достоверности диагностики оборудования, работающего в различных скоростных режимах. Теоретически обоснована независимая обработка сигнала в трех частотных диапазонах. Экспериментально показано, что мощность вибрации зависит по-разному от скорости оборудования в различных диапазонах частот вибросигнала. Показана эффективность компенсации изменения мощности вибрации при помощи оцененных на ансамбле сигналов зависимостей оконного СКЗ от скорости вращения вала.

Оценка зависимости статистических показателей вибросигнала от скоростного режима оборудования

Одна из важнейших задач – уменьшение разброса измеряемых величин для построения более достоверной оценки состояния оборудования. Из предыдущего опыта диагностики известно, что изменение скорости вращения вала оборудования приводит к увеличению разброса статистических показателей, что затрудняет анализ их трендов. В результате анализа экспериментальных данных и обзора литературы был сделан вывод о том, что необходимо также учитывать различные свойства частотных областей вибросигнала и резонансы оборудования.

В различных частотных областях вибрационный сигнал имеет различное происхождение, состав и характер распространения по конструкции [8]. В низкочастотной области (до 200...300 Гц) колебания вызваны главным образом неуравновешенностями вращающихся масс. В среднечастотном диапазоне (200...300–1000 Гц) механизм представляет собой множество колебательных подсистем, соединенных упругими связями. В высокочастотной области вибросигнал имеет характер диффузного акустического поля, образованного изгибными, крутильными, продольными и сдвиговыми волнами.

Из приведенных из литературы сведений следует, что образование вибрации в различных частотных диапазонах описывается различными моделями, однако аналитическое выражение зависимости мощности сигнала от скорости вращения вала неизвестно. К тому же образование вибрации зависит от множества параметров, таких как геометрические размеры и материалы элементов, способ их соединения. На рис. 1 приведен пример зависимости амплитуд спектральных составляющих вибрации от скорости вращения вала. Показаны спектры трех сигналов, снятых со стенда при постоянных скоростях вращения 900, 600 и 300 об/мин в трех диапазонах.

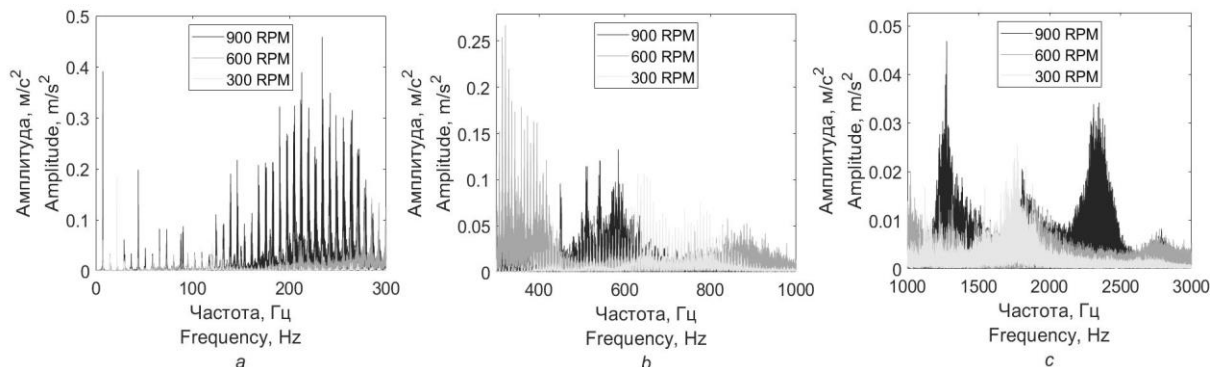


Рис. 1. Спектры передискретизованных вибросигналов, снятых со стенда при различной скорости в частотных диапазонах: *a* – 0...300 Гц; *b* – 300...1000 Гц; *c* – 1...3 кГц
Fig. 1. Spectra of resampled signals of speed-variated test stand vibration in frequency ranges: *a* – 0...300 Hz; *b* – 300...1000 Hz; *c* – 1...3 kHz

При изменении частоты вращения вала спектральные компоненты вибрации сдвигаются по частотной оси пропорционально этому изменению. Диагностическая система, в которой применяется предложенный алгоритм, предварительно передискретизирует сигналы с шагом, равномерным по фазе, чтобы скомпенсировать этот сдвиг. Для указанных реализаций было скомпенсировано отклонение скорости вала от 450 об/мин. В данной статье не рассматривается алгоритм передискретизации, его работа подробно описана в [9]. Влияние передискретизации на уровень составляющих амплитудного спектра рассматривалось в [10]. На графиках спектров передискретизованных сигналов показано, что данные сигналы претерпевают линейные искажения при изменении скорости вала.

Учитывая вышесказанное, предложено для каждой единицы оборудования экспериментально оценивать зависимость изменения мощности сигнала от скорости вращения вала оборудования. Для оценки изменения мощности вибрации при изменении скорости вращения вала выбрано его оконное СКЗ, которое рассчитывается по формуле (1). Каждый отсчет формируется усреднением СКЗ сигнала в скользящем временном окне. Ширина окна выбиралась опытным путем с учетом максимальной скорости изменения частоты вращения вала. В данной работе использовалось окно шириной 1 с.

Каждый сигнал разбивается на три частотных диапазона, рассмотренных выше, путем полосовой Фурье-фильтрации [11]. Метод основан на обратном БПФ комплексных спектральных коэффициентов, соответствующих выбранному частотному диапазону. Сигнал не имеет скачков и разрывов, заметного вклада эффекта Гиббса не наблюдается. Для проверки применимости Фурье-фильтрации реализации вибрации разбивались на три частотных диапазона, затем исходная реализация восстанавливалась суммированием полученных сигналов. Дисперсия разности исходной и полученной реализации на три порядка меньше дисперсии исходного сигнала. В каждом частотном диапазоне оценивается СКЗ сигнала $x_k^r(t)$ в скользящем временном окне:

$$P_k^r(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T/2}^{t+T/2} (x_k^r(\tau))^2}, \quad (1)$$

где T – ширина окна, которая подбиралась опытным путем, k – номер сигнала в ансамбле, r – индекс текущего частотного диапазона, τ – середина временного окна.

Диапазон изменения скорости $s(t)$ разбивается на ряд дискретных значений $s_1, \dots, s_{i-1}, s_i, \dots, s_N$, где s_1 и s_N – границы диапазона. Рассчитывается медианное значение отсчетов $P_k^r(t)$, соответствующих временным отсчетам, при которых скорость вала попадает в промежутки $s_{i-1} \dots s_i$:

$$\overline{P_k^r(i)} = Me(P_k^r(t))|_{s_{i-1} < s(t) < s_i}, \quad (2)$$

где $Me(X)$ – медиана выборочных значений величины X . Медианное значение более устойчиво к выбросам, чем среднее [12]. Скорость вала в каждый момент времени $s(t)$ оценивается интерполяцией значений, измеренных тахометром. Поскольку мощность вибрации зависит от множества факторов, усредненные для одной реализации зависимости имеют достаточно сильный разброс, СКО величин $\overline{R_k^r(S)}$ составляет до половины их значений. Поэтому итоговая зависимость СКЗ вибросигнала от скорости вала $\langle \overline{R_r(S)} \rangle$ оценивается усреднением значений $\overline{R_k^r(S)}$ по ансамблю сигналов:

$$\langle \overline{R_r(S)} \rangle = Me(\overline{R_k^r(S)}). \quad (3)$$

В ходе диагностики оборудования на предварительном этапе обработки каждой реализации полученные для каждого частотного диапазона зависимости $\langle \overline{R_r(S)} \rangle$ используются для устранения зависимости мощности сигнала вибрации от скорости вращения. Для каждого сигнала рассчитывается величина $\hat{R}_r(t)$, отражающая изменение мощности

обрабатываемого вибросигнала во времени. Для ее получения $\langle \overline{R_r(S)} \rangle$ интерполируется в каждой точке $s(t)$, где узлами интерполяции являются выбранные ранее дискретные значения скорости $s_i, i = 1 \dots N$. Все процедуры интерполяции выполняются встроенной в пакет MatLab функцией `interp1`. В данной работе используется кусочная кубическая интерполяция [13], так как результирующая кривая более гладкая, чем при использовании кусочной линейной интерполяции, и при этом проходит через узлы интерполяции. Вычисляется отношение усредненных по ансамблю СКЗ вибрации, соответствующих текущей скорости вала $s(t)$ и постоянной величины $\langle \overline{R_r(S_0)} \rangle$, равной оконному СКЗ сигнала при постоянной скорости S_0 , для каждого момента времени:

$$C_r(t) = \hat{R}_r(t) / \langle \overline{R_r(S_0)} \rangle. \quad (4)$$

Отсчеты исходного k -го сигнала в r -м диапазоне $x_k^r(t)$ делятся на вычисленные отношения $C_r(t)$, которые зависят только от текущей скорости, и суммируются для получения полного сигнала виброускорения:

$$x_k(t) = \sum_{r=1}^3 x_k^r(t) / C_r(t). \quad (5)$$

Таким образом, компенсируется изменение оконного СКЗ, обусловленное изменением скорости. Изменение СКЗ сигнала, обусловленное другими причинами, сохраняется.

Результаты натурного моделирования

Для оценки зависимости СКЗ сигнала от скорости вращения главного вала синхронно записывались виброускорение на корпусе испытательного стенда (рис. 2) и скорость вращения его вала. На стенд устанавливался диагностируемый подшипник качения, в точке его крепления устанавливался акселерометр. Место его установки обосновано тем, что в данной точке высокочастотная вибрация подшипников мотора затухает. Вибрация диагностируемого подшипника и вала преодолевает наименьшее возможное расстояние.

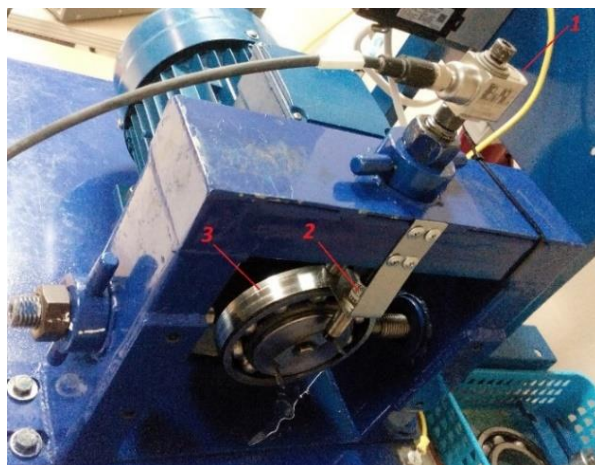


Рис. 2. Испытательный стенд: 1 – акселерометр; 2 – тахометр; 3 – диагностируемый подшипник
Fig. 2. Test bench: 1 – accelerometer; 2 – tachometer; 3 – bearing under test

Работа предложенного алгоритма проверялась на выборке сигналов вибрации испытательного стенда. Скорость вращения вала менялась в ходе записи сигналов. Диапазоны изменения скорости варьировались в пределах 200 ... 900 об/мин. Первые 38 сигналов записаны при установленном исправленном подшипнике. Остальные 41 сигнал сняты после монтажа подшипника с выраженным дефектом наружного кольца.

На рис. 3 приведены зависимости СКЗ вибросигналов исправного подшипника в различных частотных диапазонах от скорости вращения вала. Штриховой линией показаны

временные зависимости оконных СКЗ сигналов $R_k^r(t)$, полученные по формуле (1). Сплошной линией отражены усредненные по ансамблю зависимости СКЗ сигнала от скорости вала (3). Следует отметить, средние СКЗ некоторых реализаций отличались в несколько раз от усредненных по ансамблю значений. В каждом диапазоне частот вибросигнала механизм имеет резонанс при различных скоростях вращения вала.

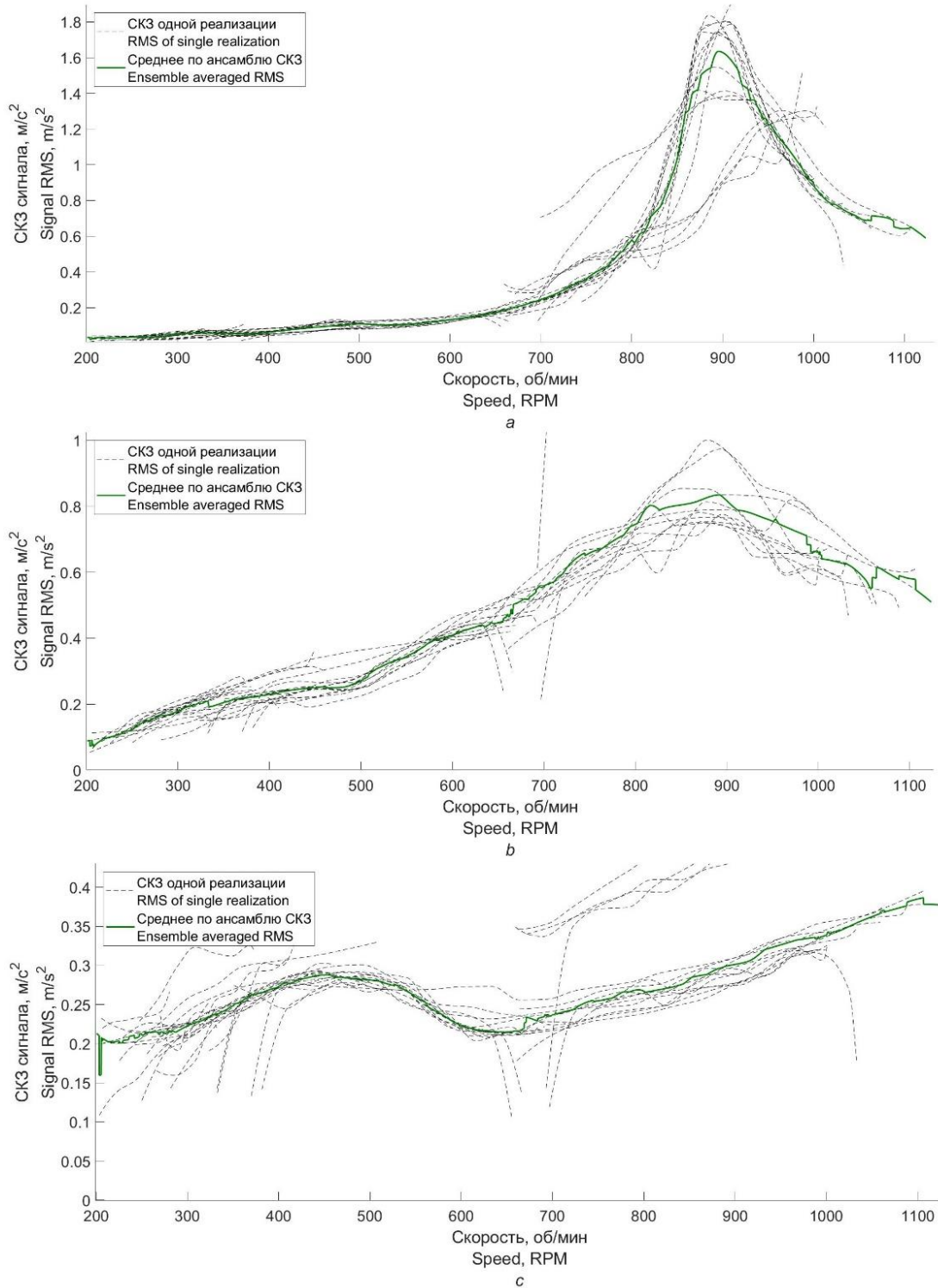


Рис. 3. Зависимости СКЗ вибросигнала от скорости вращения вала в частотных диапазонах:
 $a - 0 \dots 200$ Гц; $b - 200 \dots 1000$ Гц; $c - 1 \dots 8$ кГц

Fig. 3. Dependencies of vibration signal RMS of shaft speed in frequency ranges:
 $a - 0 \dots 200$ Hz; $b - 200 \dots 1000$ Hz; $c - 1 \dots 8$ kHz

Результаты компенсации изменения мощности вибросигнала

На рис. 4 приведен пример реализации сигнала виброускорения при изменении скорости от 600 до 900 об/мин. Оценка оконного СКЗ исходного сигнала меняется в зависимости от скорости вращения вала. Оценка, полученная после компенсации изменения мощности сигнала, незначительно отклоняется от среднего значения, соответствующего скорости вращения вала S_0 , выбранной 450 об/мин.

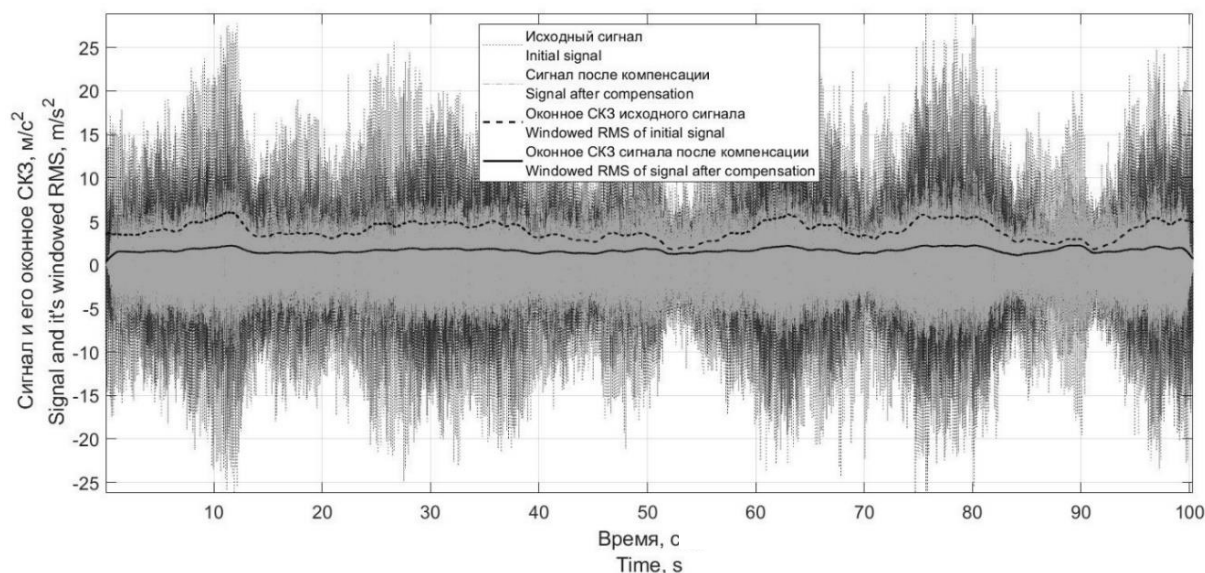


Рис. 4. Пример реализации сигнала виброускорения и его мгновенное СКЗ
Fig. 4. Example of vibrational acceleration signal realization and its instantaneous RMS

На рис. 5 показано изменение во времени статистических параметров вибросигналов выборки¹. По оси абсцисс отложен номер записи, по оси ординат – параметры соответствующего сигнала виброускорения. Разными градациями заливки выделены уровни параметров, превышение которых является признаком ухудшения состояния оборудования. Зоны А, В, С и D, согласно принятой терминологии (ISO 7919, ISO 2372, ISO 10816), соответствуют состояниям агрегата: новая машина, вводимая в эксплуатацию; пригодная без ограничения сроков эксплуатации; непригодная для длительной эксплуатации машина; вибрация агрегата вызывает его серьезные повреждения. Используемая диагностическая система подбирает эти уровни автоматически в зависимости от среднего значения и среднеквадратического отклонения параметров, полученных для исправного оборудования. Их значительный разброс затрудняет оценку уровней, сигнализирующих об ухудшении состояния оборудования.

После компенсации изменений СКЗ сигналов, обусловленных изменением скорости вала, по графику изменения СКЗ виброускорения нетрудно определить момент замены подшипника. Пик-фактор сигналов виброускорения имеет более существенный разброс. Его значения, вычисленные без предварительной компенсации СКЗ сигналов, снятых с исправного подшипника, превышают автоматически оцененные допустимые уровни. После предварительного применения предложенного алгоритма компенсации момент появления неисправности определен более точно.

¹ Используемый в данной работе набор данных доступен по адресу <http://dx.doi.org/10.17632/6k6fbzbc6vv.1>.
The dataset used in this work is available at <http://dx.doi.org/10.17632/6k6fbzbc6vv.1>

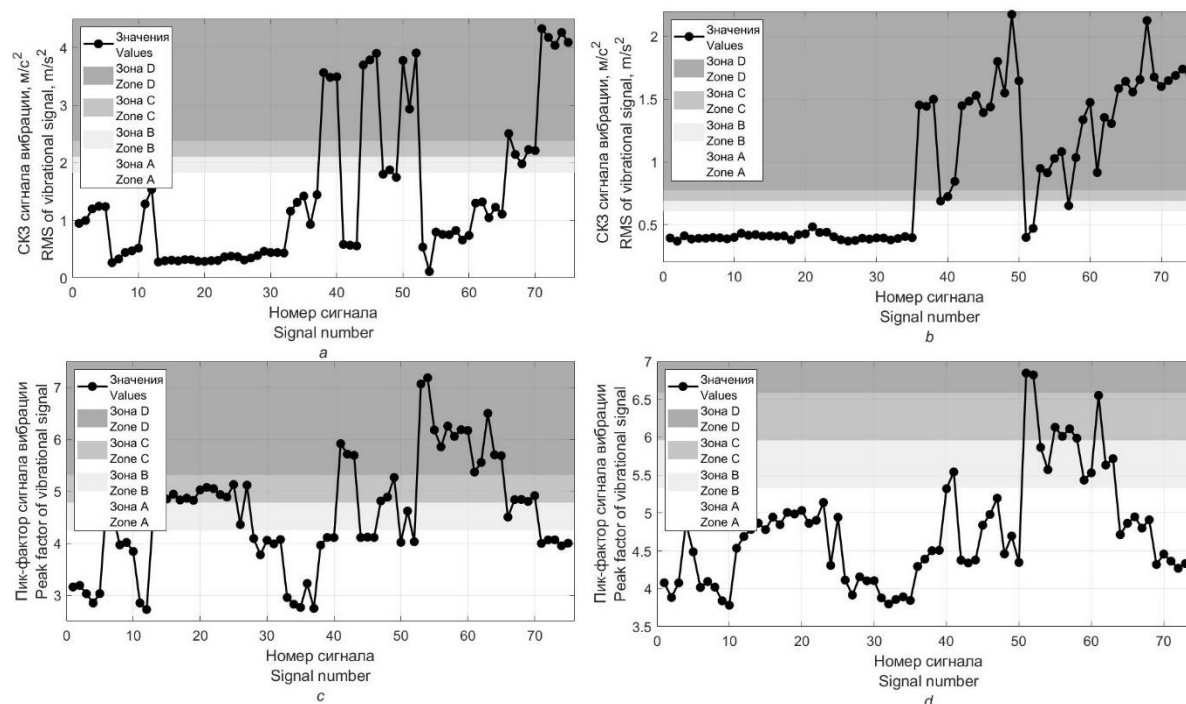


Рис. 5. Статистические параметры вибросигналов выборки без предварительной компенсации изменения мощности (слева) и с компенсацией (справа): *a, b* – СКЗ; *c, d* – пик-фактор

Fig. 5. Statistical parameters of dataset vibration signals without (left) and with (right) preliminary compensation for power variation: *a, b* – RMS; *c, d* – peak-factor

Закключение

В статье показано, что при применении компенсации изменения статистических показателей вибросигнала при изменении его скоростного режима возможно повысить надежность плано-предупредительного технического обслуживания. Компенсация изменения мощности вибросигнала при использовании эмпирической модели зависимости его мгновенного СКЗ от скорости уменьшает разброс статистических показателей и сохраняет изменение мощности сигнала, вызванное развивающимися дефектами оборудования. Показана эффективность предварительной компенсации изменения СКЗ при изменении скорости оборудования для анализа трендов статистических показателей. Рост СКЗ и пик-фактора сигналов виброускорения является достоверным признаком ухудшения технического состояния оборудования.

Список литературы

1. Абрамов И.Л. *Вибродиагностика энергетического оборудования*. Кемерово: КузГТУ; 2011.
2. Scheffer C., Girdhar P. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Oxford: Elsevier; 2004.
3. Ширман А.Р., Соловьёв А.Б. *Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования*. Москва: Наука; 1996.
4. Беляковский Н.Г., Дондошанский В.К., Дуан Н.И., Попков В.И., Тузов Л.В. *Вибрация энергетических машин: справочное пособие*. Ленинград: Машиностроение; 1974.
5. Матюшкова О.Ю., Тэттер В.Ю. Современные методы виброакустического диагностирования. *Омский научный вестник*. 2013;123(3):294-299.
6. Генрике Б.Л., Абрамов И.Л., Генрике П.Б. *Вибродиагностика горных машин и оборудования: учебное пособие*. Кемерово: КузГТУ; 2007.
7. Луковников В.И., Хабибуллин Д.А., Логвин В.В., Фершиши Н.Б.А. Вибродиагностирование технического состояния роторного оборудования взрывоопасных химических производств и процессов. *Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого*. 2003;2:33-38.

8. Генкин М.Д., Соколова А.Г. *Виброакустическая диагностика машин и механизмов*. Москва: Машиностроение; 1987.
9. Zhang X., Wen G., Wu T. A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox. *J. Vibroengineering*. 2012;14(4):1766-1774.
10. Асламов Ю.П., Асламов А.П., Давыдов И.Г., Цурко А.В. Влияние изменения скорости вращения вала роторного оборудования на обработку в частотной области. *Доклады БГУИР*. 2018;113(13):13-18.
11. Воскобойников Ю.Е., Гочаков А.В., Колкер А.Б. *Фильтрация сигналов и изображений: фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad)*. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин); 2010.
12. Leys C., Ley C., Klein O., Bernard P., Licata, L. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J. Exp. Soc. Psychol.* 2013;49(4):764-766.
13. Kahaner D, Moler C., Nash S. *Numerical methods and software*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 1988.

References

1. Abramov I.L. [*Vibrational diagnostics of power equipment*]. Kemerovo: KuzGTU; 2011. (In Russ.)
2. Scheffer C., Girdhar P. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Oxford: Elsevier; 2004.
3. Shirman A.R, Solovyov A.B. [*Practical vibration diagnostics and monitoring of the state of mechanical equipment*]. Moscow: Nauka; 1996. (In Russ.)
4. Belyakovskij N.G., Dondoshanskij V.K., Duan N.I., Popkov V.I., Tuzov L.V. [*Electrical machines vibration: handbook*]. Leningrad: Mashinostroenie; 1974. (In Russ.)
5. Matyushkova O.Yu., Tetter V.Yu. [Modern methods of vibroacoustic diagnostics]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2013;123(3):294-299. (In Russ.)
6. Genrike B.L., Abramov I.L., Genrike P.B. [*Vibrodiagnostics of mining machinery and equipment: a tutorial*]. Kemerovo: KuzGTU; 2007. (In Russ.)
7. Lukovnikov V.I., Habibullin D.A., Logvin V.V., Fershishi N.B.A. [Vibrodiagnostics of the technical condition of rotary equipment of explosive chemical plants and processes]. *Vestnik GGTU imeni P.O. Suhogo*. 2003;(2):33-38. (In Russ.)
8. Genkin M.D., Sokolova A.G. [*Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms*]. Moscow: Mashinostroenie; 1987. (In Russ.)
9. Zhang X., Wen G., Wu T. A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox. *J. Vibroengineering*. 2012;14(4):1766-1774.
10. Aslamov Y.P., Aslamov A.P., Davydov I.G., Tsurko A.V. Influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on frequency-domain processing. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;113(13):13-18. (In Russ.)
11. Voskoboynikov Y.E, Gochakov A.V., Kolker A.B. [*Filteration of signals and images : Fourier and wavelet algorithms (with examples in Mathcad)*]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin); 2010. (In Russ.)
12. Leys C., Ley C., Klein O., Bernard P., Licata, L. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J. Exp. Soc. Psychol.* 2013;49(4):764-766.
13. Kahaner D, Moler C., Nash S. *Numerical methods and software*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 1988.

Сведения об авторах

Кечик Д.А., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kechik D.A., PG student of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-171-23-71;
e-mail: ya.dan.kechik@ya.ru
Кечик Даниил Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-171-23-71;
e-mail: ya.dan.kechik@ya.ru
Kechik Daniil Aleksandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-35-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.615.5

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ КОМПЛЕКСАХ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ МЕТОДОМ ЛЕВЕНБЕРГА – МАРКВАРДТА

ДМИТРЕНКО А.А.¹, СЕДЫШЕВ С.Ю.², КУЛЕШОВ Ю.Е.¹, БОГАТЫРЕВ А.А.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ООО «НТП РЭАТЕХНО» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 27 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье проведено исследование и анализ результатов применения численных итерационных методов решения систем нелинейных уравнений (Ньютона, модифицированный метод Ньютона, градиентного спуска, последовательных итераций, Левенберга – Марквардта), составленных и используемых для вычисления прямоугольных пространственных координат источников радиоизлучения в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации различной конфигурации (имеющих в своем составе от 3 до 4 приемных пунктов). Целью исследований явилось определение оптимального числа приемных пунктов и выбор наиболее эффективного алгоритма координатных преобразований вектора наблюдаемых параметров (совокупность оценок разностей дальности от источника радиоизлучения до соответствующих пар приемных пунктов) в вектор измеряемых параметров (прямоугольные пространственные координаты объекта наблюдения). В качестве критериев сравнения результатов использования рассматриваемых методов использовались следующие параметры: рабочая зона комплекса пассивной локации (часть пространства, в пределах которой отклонение оценок координат целей от их истинных значений не превышает максимально допустимых значений); средняя ошибка вычисления пространственных координат целей в рабочей зоне; число итераций вычисления координат цели в анализируемой части пространства. Проведя сравнительный анализ полученных характеристик и зависимостей, был сделан вывод о том, что оптимальным является включение в состав разностно-дальномерных комплексов пассивной локации четырех приемных пунктов и использование для вычисления пространственных координат источников радиоизлучения метода Левенберга – Марквардта.

Ключевые слова: разностно-дальномерный комплекс пассивной локации, прямоугольные пространственные координаты, численный метод решения системы нелинейных уравнений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю., Кулешов Ю.Е., Богатырев А.А. Вычисление пространственных координат целей в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации методом Левенберга – Марквардта. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 35-43.

CALCULATION OF SPATIAL TARGET COORDINATES IN RANGE-DIFFERENCE PASSIVE RADARS BY THE LEVENBERG – MARQUARDT METHOD

ALES A. DMITRENKO¹, SERGEY Y. SEDYSHEV², YURI Y. KULESHOV¹,
ANATOLY A. BOGATYREV¹

¹ *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

² *NTP REATehno (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 27 February 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This article studies and analyzes the results of applying numerical iterative methods for solving nonlinear equation systems (Newton, modified Newton's method, gradient descent, sequential iterations, Levenberg – Marquardt), compiled and used to calculate the rectangular spatial coordinates of radio emission sources in range-difference passive radars of various configurations (incorporating from 3 to 4 receiving points). The aim of the research was to determine the optimal number of receiving points and to select the most effective algorithm for coordinate transformations of the vector of observed parameters (a set of range difference estimates from radio emission sources to the corresponding pairs of receiving points) into the vector of measured parameters (rectangular spatial coordinates). The following parameters were used as comparison criteria: passive radar working area (a part of space where the deviation of target coordinate estimates from their true values does not exceed the maximum tolerable values); average error in calculating spatial coordinates in the working area; iterations number of coordinate calculation in the analyzed part of space. Upon completing a comparative analysis of obtained characteristics and dependencies, we concluded that it is optimal to include four receiving points in a range-difference passive radar and use the Levenberg – Marquardt method to calculate the spatial coordinates of radio emission sources.

Keywords: range-difference passive radar, rectangular spatial coordinates, numerical method for solving nonlinear equation systems.

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

For citation. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Y., Kuleshov Y.Y., Bogatyrev A.A. Calculation of spatial target coordinates in range-difference passive radars by the Levenberg – Marquardt method. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 35-43.

Введение

Снижение радиолокационной заметности средств воздушного нападения, интенсивное применение помех и противорадиолокационных ракет значительно снижают эффективность радиолокационных станций. Использование комплексов пассивной локации (КПЛ) позволяет повысить скрытность и выживаемость группировки противовоздушной обороны (ПВО), так как противорадиолокационные ракеты неприменимы против пассивных систем, а постановщики помех и другие излучающие радиоэлектронные системы служат источниками информации о своем местоположении.

Появление новых видов средств воздушного нападения, увеличение их количества при ведении боевых действий, расширение номенклатуры используемых бортовых радиоэлектронных систем обуславливают актуальность исследований, имеющих целью повышение эффективности работы комплексов пассивной локации.

Основу КПЛ составляют разнесенные в пространстве приемные пункты (ПП), объединяемые линиями связи. Измеряемыми параметрами при этом являются или угловые направления на источники радиоизлучения (ИРИ) (при наличии на ПП направленных антенных систем), или разности времени запаздывания между соответствующими парами ПП.

Координаты ИРИ определяются в результате применения одного из следующих способов: угломерного, разностно-дальномерного или различного рода их комбинаций [1].

Разностно-дальномерный (РД) способ, рассматриваемый в данной работе, имеет по сравнению с другими следующие преимущества [2, 3]: а) высокая потенциальная точность определения пространственных координат ИРИ; б) сравнительно невысокая стоимость ненаправленных антенн; в) отсутствие необходимости сложной системы координации обзора пространства системой направленных антенн; г) при использовании базово-корреляционной обработки сигналов ИРИ для оценки разностей времени запаздывания отсутствует необходимость в достоверной информации о параметрах и характеристиках обрабатываемых сигналов.

Процесс обработки радиолокационной информации в РД КПЛ представляет собой последовательное (на некоторых этапах параллельное) решение следующих задач [1–3]: обнаружение сигналов ИРИ на ПП, отождествление обнаруженных сигналов между ПП, оценку разностей дальности относительно пар ПП КПЛ, определение пространственных координат ИРИ. В настоящей статье проведено исследование и анализ результатов применения различных способов вычисления прямоугольных пространственных координат ИРИ путем обработки совокупностей оценок разностей дальности с целью определения оптимального числа ПП КПЛ и выбора наиболее эффективного алгоритма координатных преобразований.

Постановка задачи

Измеряемыми параметрами РД КПЛ являются разности дальностей. Выходная координатная информация представляется в прямоугольной системе координат. Взаимосвязь между этими системами координат является нелинейной. Математически преобразование координатной информации из одной системы в другую представляет собой решение системы нелинейных уравнений (СНУ), в которую в качестве известных значений входят координаты ПП системы и измеренные значения разности дальностей ИРИ относительно соответствующих пар ПП.

Для определения количественного состава КПЛ и составления соответствующих СНУ необходимо учитывать следующие факторы:

- с точки зрения минимизации сложности и стоимости системы естественным является включение в состав КПЛ минимально необходимого количества ПП;
- в определенных условиях обстановки часть необходимой совокупности измерений недоступна (например, когда сигналы ИРИ не обнаружены на одном из ПП КПЛ).

С учетом данных факторов в настоящей работе были рассмотрены три возможных ситуации:

1. В состав КПЛ входят четыре ПП, измеряются три разности дальностей относительно одного из ПП (центрального), вычисляются три прямоугольных координаты ИРИ (X, Y, Z). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \Delta r_{01} = 0 \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{02} = 0 \\ \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{03} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

2. В состав КПЛ входят три ПП, измеряются две разности дальностей, вычисляются две прямоугольных координаты ИРИ (X, Y). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \Delta r_{12} = 0 \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \Delta r_{13} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

3. В состав КПЛ входят три ПП, измеряются три разности дальностей, вычисляются три прямоугольных координаты ИРИ (X, Y, Z). В этом случае СНУ имеет вид

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \Delta r_{12} = 0 \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \Delta r_{23} = 0 \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} - \Delta r_{31} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Задача поиска решений данных СНУ не имеет достаточно эффективных методов общего характера. Их решения можно получить только приближенными, итерационными методами, которые позволяют получить последовательность приближений $\mathbf{X}_k = (x_k, y_k, z_k)$, $k = 0, 1, 2 \dots n$. Если итерационный процесс сходится, то граничное значение является решением системы уравнений [4–5].

Для вычисления корней СНУ в данной работе были исследованы наиболее распространенные на практике следующие методы: Ньютона, модифицированный метод Ньютона, градиентного спуска, последовательных итераций и Левенберга – Марквардта.

Для проведения сравнительного анализа рассматриваемых алгоритмов координатных преобразований были выбраны следующие критерии качества:

- рабочая зона КПЛ – часть пространства, в пределах которой отклонение оценок координат целей от их истинных значений не превышает максимально допустимых значений;
- средняя ошибка вычисления пространственных координат в рабочей зоне КПЛ;
- число итераций вычисления координат ИРИ в анализируемой части пространства.

Методика проведения эксперимента

При наличии в составе КПЛ трех ПП они располагались на удалении 20 км от начала системы координат при угловых смещениях в 120° относительно друг друга. При исследовании конфигурации КПЛ, состоящего из четырех ПП, еще один приемник располагался в начале системы координат.

Определялась зона исследования в виде квадрата размером 400×400 км. Плоскостные координаты ИРИ (X, Y) задавались последовательно с шагом 10 км. Высота ИРИ была принята равной 10 км. Для каждой анализируемой точки местонахождения ИРИ вычислялся соответствующий набор разностей дальности (с учетом известных координат ПП КПЛ и ИРИ), после чего путем решения системы нелинейных уравнений каждым из анализируемых методов вычислялись пространственные координаты ИРИ.

При оценке величины рабочей зоны КПЛ принималось, что ошибка вычисления пространственных координат ИРИ не должна превышать 2000 м. После определения пространственных координат ИРИ во всех возможных точках в пределах исследуемой зоны производилась оценка средней ошибки вычисления координат. Также фиксировалось число вычислительных операций, затраченных на анализ всей зоны.

Результаты и их обсуждение

Применение методов Ньютона и последовательных итераций оказалось невозможным по причине вырожденности матрицы Якоби в первом случае и отсутствии сходимости итерационного процесса поиска решения СНУ во втором для всех возможных ситуаций. По этим причинам данные два метода в дальнейшем не рассматривались.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ четырех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта, модифицированный метод Ньютона) приведены на рис. 1.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта, модифицированный метод Ньютона) приведены на рис. 2.

Зависимости величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП (метод градиентного спуска, метод Левенберга – Марквардта) приведены на рис. 3. Модифицированный метод Ньютона в данном случае оказался неприменим ввиду вырожденности матрицы Якоби.

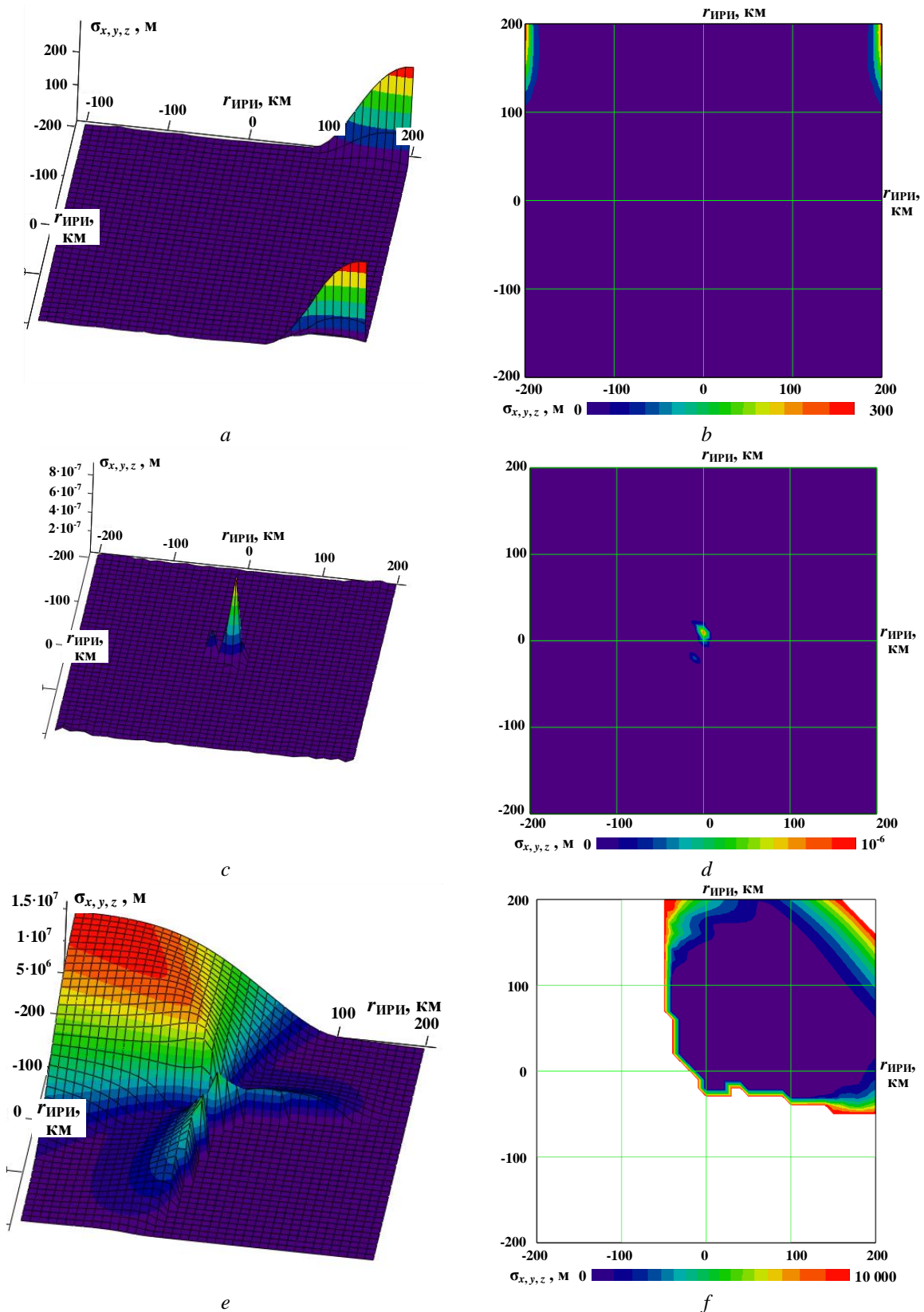


Рис. 1. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ четырех ПП: *a, b* – метод градиентного спуска; *c, d* – метод Левенберга – Марквардта; *e, f* – модифицированный метод Ньютона

Fig. 1. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y, Z) on its spatial location when 4 receivers are included in a passive radar: *a, b* – gradient descent method; *c, d* – Levenberg – Marquardt method; *e, f* – modified Newton's method

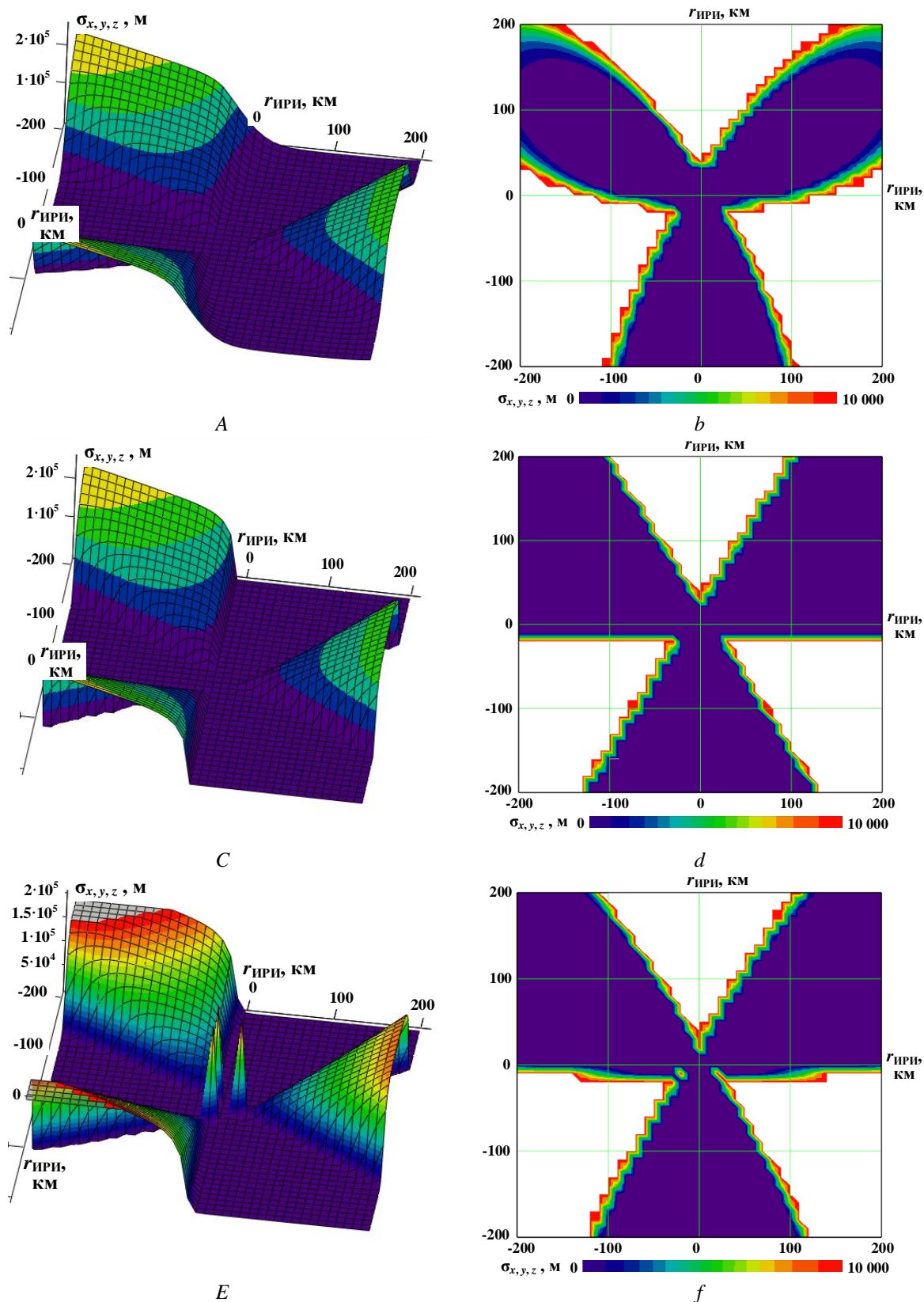


Рис. 2. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП: a, b – метод градиентного спуска; c, d – метод Левенберга – Марквардта; e, f – модифицированный метод Ньютона

Fig. 2. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y) on its spatial location when 3 receivers are included in a passive radar: a, b – gradient descent method; c, d – Levenberg – Marquardt method; e, f – modified Newton's method

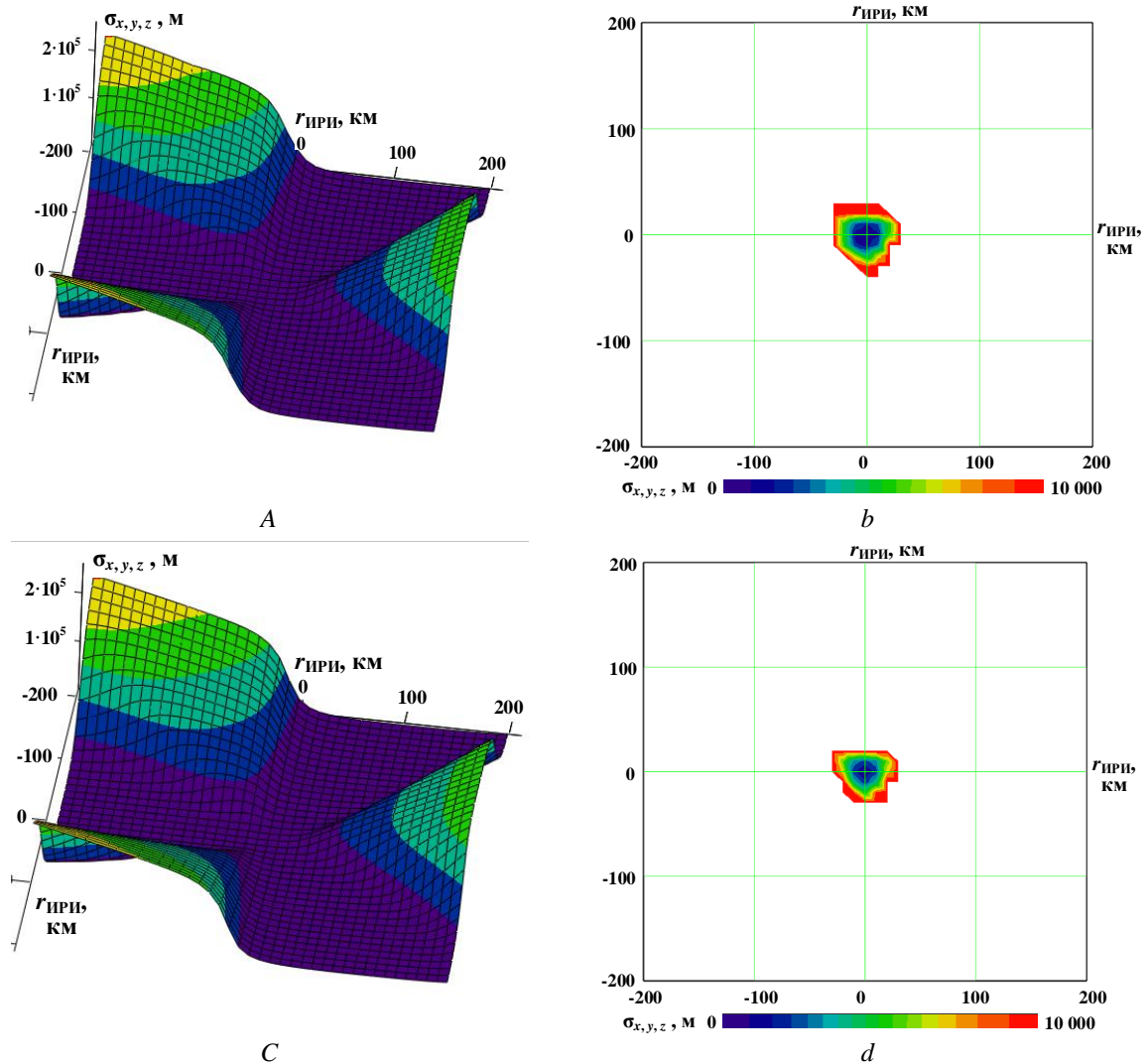


Рис. 3. Зависимость величины ошибок вычисления координат (X, Y, Z) ИРИ от его расположения в пространстве при включении в состав КПЛ трех ПП: *a, b* – метод градиентного спуска; *c, d* – метод Левенберга – Марквардта

Fig. 3. Dependence of the error magnitude of radio source coordinates (X, Y, Z) on its spatial location when 3 receivers are included in a passive radar: *a, b* – gradient descent method; *c, d* – Levenberg – Marquardt method

Размеры рабочей зоны, величина средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне при включении в состав КПЛ четырех ПП и определении трех пространственных координат (X, Y, Z) ИРИ приведены в табл. 1.

Размеры рабочей зоны, величина средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне при включении в состав КПЛ трех ПП и определении двух плоскостных координат ИРИ (X, Y) приведены в табл. 2.

Размеры рабочей зоны, величина средней ошибки вычисления координат в рабочей зоне, а также число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне при включении в состав КПЛ трех ПП и определении трех пространственных координат (X, Y, Z) ИРИ приведены в табл. 3.

Таблица 1. Показатели качества КПЛ (вычисление 3-х координат ИРИ (X, Y, Z), 4 ПП в составе КПЛ)
Table 1. Passive radar quality indicators (calculation of 3 coordinates of RFS (X, Y, Z), 4 receivers are included)

Критерий качества Quality criterion	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm	Модифицированный метод Ньютона Modified Newton Algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	100	100	26,9
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	4,91	$5,98 \cdot 10^{-9}$	304
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$3,59 \cdot 10^6$	$2,11 \cdot 10^4$	$1,59 \cdot 10^6$

Таблица 2. Показатели качества КПЛ (вычисление 2-х координат ИРИ (X, Y), 3 ПП в составе КПЛ)
Table 2. Passive radar quality indicators (calculation of 2 coordinates of RFS (X, Y), 3 receivers are included)

Критерий качества Quality criterion	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm	Модифицированный метод Ньютона Modified Newton Algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	42,7	58,8	55,4
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	188	$2,07 \cdot 10^{-3}$	38
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$8,23 \cdot 10^6$	$4,14 \cdot 10^4$	$4,87 \cdot 10^6$

Таблица 3. Показатели качества КПЛ (вычисление 3-х координат ИРИ (X, Y, Z), 3 ПП в составе КПЛ)
Table 3. Passive radar quality indicators (calculation of 3 coordinates of RFS (X, Y, Z), 3 receivers are included)

Критерий качества. Quality criterion.	Метод градиентного спуска Gradient Descent algorithm	Метод Левенберга – Марквардта Levenberg – Marquardt algorithm
Рабочая зона, % анализируемой зоны	0	0
Средняя ошибка вычисления координат в рабочей зоне, м	–	–
Число итераций при вычислении координат в анализируемой зоне	$6,78 \cdot 10^6$	$5,88 \cdot 10^6$

Заключение

Проведя сравнительный анализ полученных характеристик и зависимостей, можно сделать следующие выводы. Методы Ньютона и последовательных итераций оказались неприменимы во всех анализируемых случаях. При наличии в составе КПЛ трех ПП размеры рабочей зоны не превысили 58,8 %, что нельзя назвать удовлетворительным результатом. При наличии в составе КПЛ четырех ПП размеры рабочей зоны составили 100 % от анализируемой только при использовании методов градиентного спуска и Левенберга – Марквардта. Причем второй из данных методов оказался менее затратен в вычислительном плане, а также обеспечил значительно более высокую точность. Таким образом, оптимальным в данных условиях является включение в состав КПЛ четырех приемных пунктов и использование для вычисления пространственных координат ИРИ метода Левенберга – Марквардта.

Список литературы

1. Черняк В.С. *Многопозиционная радиолокация*. Москва: Радио и связь; 1993.
2. Дмитренко А.А., Седышев С.Ю. Межпозиционное пространственно-временное отождествление сигналов в многопозиционных базово-корреляционных комплексах пассивной локации. *Доклады БГУИР*. 2016;99:85-91.
3. Охрименко А.Е. *Основы обработки и передачи информации*. Минск: МВИЗРУ ПВО; 1990.
4. Мышенков В.И., Мышенков Е.В. *Численные методы*. Москва; 2001.
5. Noceda J. Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer; 1999.

References

1. Chernyak V.S. [*Multiposition radiolocation*]. Moscow: Radio i svyaz';1993. (In Russ.)
2. Dmitrenko A.A., Sedyshev S.Y. [Identification of signals in multi-static cross-correlation passive radars]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2016;99:85-91. (In Russ.)
3. Ohrimenko A.E. [*Fundamentals of information processing and transmission*]. Minsk: MVIZRU PVO; 1990. (In Russ.)
4. Myshenkov V.I., Myshenkov E.V. [*Numerical methods*]. Moscow; 2001. (In Russ.)
5. Nocedal J. Wright S.J. *Numerical Optimization*. New York: Springer; 1999.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Дмитренко А.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники ВВС и войск ПВО Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Седышев С.Ю., к.т.н., доцент, заместитель директора ООО «НТП РЭАТехно» по научной работе.

Кулешов Ю.Е., к.в.н., доцент, начальник военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Богатырев А.А., к.в.н., заместитель начальника военного факультета по учебной и научной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Dmitrenko A.A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Air Force and Air Defense Electronic Equipment Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Sedyshev S.Y., PhD, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work "NTP REATechno".

Kuleshov Y.E., PhD, Associate Professor, Head of the Military Faculty of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bogatyrev A.A., PhD, Deputy Head of the Military Faculty for Academic and Scientific work of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-80-83;
e-mail: a.dmitrenko@bsuir.by
Дмитренко Алесь Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
тел. +375-17-293-80-83;
e-mail: a.dmitrenko@bsuir.by
Dmitrenko Ales Alexandrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-44-52>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.89

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОПРОСОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ОБУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ

ЛИ ВЭНЬЦЗУ

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

Поступила в редакцию 22 мая 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В работе предложен подход к проектированию общей подсистемы автоматической генерации вопросов в интеллектуальных обучающих системах. Проектируемая подсистема позволяет автоматически генерировать различные типы вопросов на основе информации из базы знаний и сохранять генерируемые вопросы в базе знаний подсистемы для последующего использования. Основной частью подсистемы является модуль автоматической генерации вопросов, позволяющий генерировать вопросы разных типов на основе существующих стратегий генерации вопросов в сочетании со структурными характеристиками баз знаний, построенных по технологии OSTIS. Предложен ряд стратегий автоматической генерации вопросов, использование которых позволяет автоматически генерировать вопросы различных видов, такие как вопросы на выбор, вопросы на заполнение пробелов, вопросы на толкование определений и т. д. Важнейшей частью подсистемы является база знаний, в рамках которой хранится онтология вопросов, включая сами экземпляры вопросов. В данной работе база знаний построена на основе стандартов технологии OSTIS. Разработана классификация типов автоматически генерируемых вопросов, а также предметная область для хранения генерируемых вопросов и соответствующая им онтология, описанная в базе знаний подсистемы. Генерируемые вопросы хранятся в базе знаний подсистемы в виде SC-кода, который является стандартом технологии OSTIS. При тестировании пользователей данные генерируемые вопросы преобразуются в соответствующие вопросы на естественном языке с помощью естественно-языкового интерфейса. В сравнении с существующими подходами, предложенный в данной работе подход имеет определенные преимущества, а подсистема, разработанная с использованием предложенного подхода, может быть применена в различных обучающих системах, построенных по технологии OSTIS.

Ключевые слова: генерация вопросов, базы знаний, обучающие системы, технология OSTIS.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ли Вэньцзу. Онтологический подход к автоматической генерации вопросов в интеллектуальных обучающих системах. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 44-52.

ONTOLOGICAL APPROACH TO AUTOMATIC GENERATION OF QUESTIONS IN INTELLIGENT LEARNING SYSTEMS

LI WENZU

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

Submitted 22 May 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This article proposes an approach for designing a general subsystem of automatic generation of questions in intelligent learning systems. The designed subsystem allows various types of questions to be automatically generated based on information from the knowledge bases and save the generated questions in the subsystem knowledge base for future use. The main part of the subsystem is the automatic generation module of questions, which allows one to generate questions of various types based on existing question generation strategies in combination with the structural characteristics of knowledge bases built using OSTIS technology. In this article, a variety of strategies for automatically generated questions are proposed, the use of which allows various types of questions to be automatically generated, such as multiple-choice questions, fill-in-the-blank questions, questions of definition interpretation and etc. The most important part of the subsystem is the knowledge base, which stores the ontology of questions, including the question instances themselves. In this article, the knowledge base is constructed based on OSTIS technical standards. The type classification of automatically generated questions was developed, as well as the subject area for storing generated questions and the corresponding ontology described in the knowledge base of the subsystem. The generated questions are stored in the subsystem knowledge base in the form of SC-code, which is the OSTIS technology standard. When testing users, these automatically generated questions are converted to the corresponding natural language form through the natural language interface. Compared with the existing approaches, the approach proposed in this article has certain advantages, and the subsystem designed using this approach can be used in various OSTIS-based systems driven by OSTIS technology.

Keywords: question generation, knowledge base, learning systems, OSTIS technology.

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

For citation. Li Wenzu. Ontological approach to automatic generation of questions in intelligent learning systems. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 44-52.

Введение

В последние годы с развитием технологий искусственного интеллекта образовательные средства перешли от традиционных мультимедийных образовательных технологий к эпохе интеллектуального образования [1]. Использование в процессе обучения передовых способов, предоставляемых технологиями искусственного интеллекта, может стимулировать интерес пользователей к обучению и повысить его эффективность.

По сравнению с традиционными мультимедийными обучающими системами (ТМОС), наиболее важной особенностью интеллектуальных обучающих систем (ИОС) является то, что ИОС может использовать базу знаний для автоматического генерирования различных типов вопросов и автоматической проверки ответов пользователей. Но подходы к генерации вопросов, предложенные большинством исследователей, позволяют генерировать только самые простые вопросы (вопросы на выбор, вопросы на заполнение пробелов и т. д.), и корреляция между правильными и неправильными (мешающими) вариантами генерируемых вопросов на выбор невысока. Поэтому большинство подходов к автоматической генерации вопросов не отвечают требованиям практического применения, а предложенные подходы реализуются на конкретных системах, так что они не являются универсальными.

В данной работе предложен подход к автоматической генерации вопросов для решения вышеуказанных проблем. Предлагаемый подход направлен на разработку общей подсистемы автоматической генерации вопросов для интеллектуальных обучающих систем, построенных по технологии OSTIS [2]. Следует отметить, что в качестве демонстрационной системы выбрана система по дискретной математике, разрабатываемая при участии студентов и преподавателей кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Существующие подходы и проблемы

Методы автоматической генерации вопросов (МАГВ) позволяют автоматически генерировать тестовые вопросы из электронных документов, корпусов текстов и баз знаний с помощью компьютерных технологий. По сравнению с традиционным подходом, предполагающим использование базы данных для извлечения вопросов, МАГВ основаны на знаниях, поэтому генерируемые вопросы являются более гибкими [1, 3, 4].

МАГВ можно разделить на следующие категории по источнику знаний:

- на основе электронных документов;
- на основе корпуса текстов;
- на основе базы знаний.

С развитием технологий семантических сетей использование баз знаний для автоматической генерации вопросов стало основным направлением исследований. База знаний создается после того, как специалисты предметной области проанализируют полученные знания. Данные знания будут профильтрованы и организованы в определенную структуру, поэтому вопросы, автоматически генерируемые с помощью базы знаний, являются более гибкими и разнообразными [1, 4]. Ниже будут представлены некоторые результаты исследований по автоматической генерации вопросов:

– система автоматической генерации вопросов на выбор, разработанная Andreas Papasalouros, в основном использует отношения между родительскими классами и подклассами, классами и элементами, элементами и атрибутами в онтологии OWL для автоматической генерации вопросов на выбор [5];

– на основе вышеупомянутого подхода Li Hui была разработана онтология в сфере компьютерной теории с помощью Protégé и использованы различные онтологические отношения, чтобы автоматически генерировать вопросы на выбор, вопросы на заполнение пробелов и вопросы суждения [1, 4, 5].

Хотя подходы, рассмотренные выше, имеют много преимуществ, существует также много проблем:

– подход к автоматической генерации вопросов с использованием электронных документов и шаблонов предложений требует большого количества шаблонов предложений, а качество генерируемых вопросов невысоко;

– объем и качество автоматически генерируемых вопросов с использованием корпуса текстов зависят от размера и качества корпуса текстов, и корреляция между неправильными вариантами и правильными вариантами генерируемых вопросов на выбор невысока;

– в настоящее время не существует единого стандарта разработки базы знаний, поэтому различные базы знаний имеют различную структуру и несовместимы друг с другом. Поскольку базы знаний несовместимы друг с другом, подход, использующий базу знаний для автоматической генерации вопросов, может быть использован только в соответствующей конкретной базе знаний, а для баз знаний, разработанных в рамках других подходов, должны разрабатываться новые соответствующие подходы к генерации вопросов;

– существующие подходы к автоматической генерации вопросов позволяют генерировать только простые объективные вопросы (те, на которые существует только один стандартный правильный ответ).

На основе существующих результатов исследований и в соответствии со стандартами технологии OSTIS [2, 6] в данной работе предложен подход к автоматической генерации субъективных и объективных вопросов с использованием базы знаний для ИОС. Объективные

вопросы относятся к типу вопросов с уникальным стандартным ответом и включают в себя вопросы на выбор, вопросы суждения и т. д. Субъективные вопросы не имеют уникальных ответов и включают вопросы на доказательство, вопросы на толкование определений и т. д. Предлагаемый подход будет реализован в рамках интеллектуальной обучающей системы по дискретной математике.

Следует подчеркнуть, что при тестировании пользователей для субъективных типов вопросов близость между ними может быть определена путем вычисления подобия между стандартными ответами и ответами пользователей. Стандартные ответы хранятся в базе знаний подсистемы автоматической генерации вопросов в виде SC-кода (в качестве основы представления знаний в рамках технологии OSTIS используется унифицированный вариант кодирования информации любого рода на основе семантических сетей, названный SC-кодом), а ответы пользователей на естественных языках (английском, китайском, русском и др.) преобразуются в SC-код с помощью естественно-языкового интерфейса [2, 6]. Основная идея вычисления подобия состоит в том, чтобы сначала разложить семантический граф стандартного ответа и семантический граф ответа пользователя (семантический граф – это неориентированный граф или направленный граф, который визуальным образом представляет семантические отношения между понятиями) на подструктуры в соответствии со структурой представления знаний, а затем вычислить подобие между стандартным ответом и ответом пользователя в соответствии с тем же числом подструктур. Поскольку проверка ответов в рамках данной статьи не является основным направлением, конкретный процесс проверки ответов не будет подробно описан.

Предлагаемый подход

В данной работе предложен подход к автоматической генерации различных типов вопросов для ИОС. Используя предлагаемый подход и технологию OSTIS [2, 6], субъективные и объективные вопросы могут быть автоматически сформированы из базы знаний. Сгенерированные вопросы хранятся в базе знаний подсистемы автоматической генерации вопросов в виде представления SC-кода [6]. Данные сгенерированные вопросы преобразованы в соответствующие вопросы на естественном языке с помощью естественно-языкового интерфейса, что не является задачей данной работы.

Рассмотрим более подробно стратегии генерации вопросов.

1. Стратегия генерации на основе элементов.

На основе ролевого отношения.

На основе бинарного отношения.

Ролевое отношение (то, которое задает роль элементов в рамках некоторого множества) и бинарное отношение (это множество отношений на множестве M , являющихся подмножеством декартова произведения множества M самого на себя) – это типы отношений, часто используемых при построении базы знаний по технологии OSTIS [6]. Ниже приведен фрагмент базы знаний в SCn-коде (одном из языков внешнего отображения SC-кода), использующий бинарное отношение “автор*”:

Понятие условной сходимости

⇒ автор*:

Иоганн Петер Густав Лежён Дирихле

Взяв в качестве примера генерируемый вопрос на заполнение пробелов, можно записать его следующим образом: «Автором понятия условной сходимости является ____». Поэтому данные отношения между элементами могут использоваться для автоматической генерации объективных вопросов.

2. Стратегия генерации на основе классов.

Данная стратегия использует различные отношения между классами, чтобы автоматически генерировать объективные вопросы.

На основе отношения “включение*”.

В базе знаний интеллектуальной системы, построенной по технологии OSTIS, многие классы содержат несколько подклассов, поэтому отношение включения между классами и подклассами используется для автоматической генерации объективных вопросов. На языке теории множеств отношение включения между классами выражается следующим образом: $S_i \subseteq C$ ($i \geq 1$), (S – подкласс, i – номер подкласса, C – родительский класс). Взяв в качестве примера генерируемый вопрос суждения, можно записать его следующим образом: $S_i \subseteq C$ является “истинным” или $S_i \subseteq C$ является “ложным”. На рис. 1 приведен пример семантической структуры вопроса на выбор, автоматически генерируемого с помощью данной стратегии на SCg-коде (SCg-код – графический вариант внешнего визуального представления SC-кода) [2].

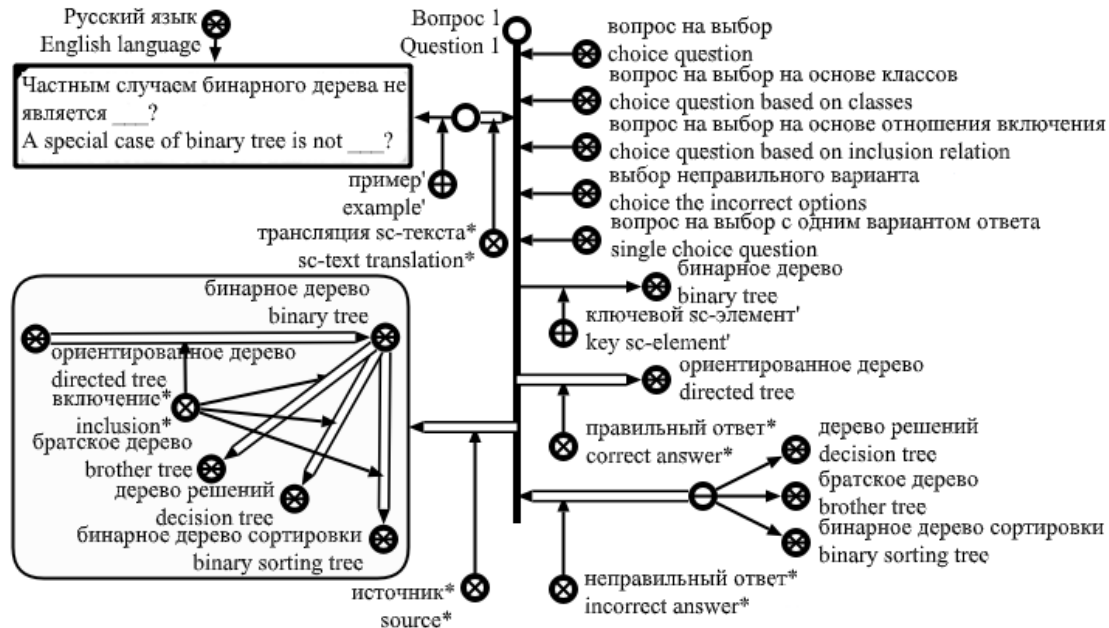


Рис. 1. Пример вопроса на выбор
Fig. 1. Example of a multiple-choice question

Пользователю предлагается выбрать один из четырех вариантов, связанных с бинарным деревом, который не является частным случаем бинарного дерева. Описание данного примера на естественном языке выглядит следующим образом:

«Частным случаем бинарного дерева не является ()?»

- A. дерево решений C. ориентированное дерево
- B. братское дерево D. бинарное дерево сортировки

На основе отношения “разбиение*”.

Областью определения отношения разбиения является семейство всевозможных множеств. В результате разбиения множества получается множество попарно непересекающихся множеств, объединение которых есть исходное множество [6]. В базе знаний, построенной по технологии OSTIS, как правило, существует много классов, удовлетворяющих отношению разбиения, поэтому данное отношение может быть использовано для автоматической генерации различных типов объективных вопросов по аналогии с отношением “включение*”.

На основе отношения “строгое включение*”.

Строгое включение является частным случаем отношения включения. Подход к автоматической генерации объективных вопросов с использованием отношения строгого включения аналогичен подходу к генерации объективных вопросов с использованием отношения включения. На языке теории множеств отношение строгого включения между классами можно выразить следующим образом: $S_i \subset C$ ($i \geq 1$), (S – подкласс, i – номер подкласса, C – родительский класс).

3. Стратегия генерации на основе идентификаторов.

Обычно некоторые множества и отношения в базе знаний имеют несколько идентификаторов (под идентификатором в технологии OSTIS понимается файл, который может быть использован для обозначения (именования) той или иной сущности в рамках какого-либо внешнего языка) [6]. Например, «в дискретной математике ориентированное множество также называется кортежем; вектором и упорядоченной последовательностью;» Взяв в качестве примера вопрос на выбор, генерируемый с использованием идентификаторов ориентированного множества, можно записать его следующим образом: «Ориентированное множество также называется ()?» Правильными вариантами этого вопроса на выбор являются идентификаторы ориентированного множества, а неправильными (мешающими) вариантами могут быть идентификаторы множеств, связанных с ориентированным множеством. Таким образом, понятия, имеющие несколько идентификаторов, могут быть использованы для автоматической генерации объективных вопросов.

4. Стратегия генерации на основе аксиом.

Многие аксиомы и их математические выражения хранятся в базе знаний по дискретной математике. Например, в базе знаний формально представлена аксиома объединения и соответствующее ей математическое выражение: $\forall a \exists d \forall c (c \in d \sim \exists b (b \in a \wedge c \in b))$. Таким образом, эта аксиома и ее математическое выражение могут быть использованы для генерации аналогичных типов вопросов, описанных выше.

5. Стратегия генерации на основе свойств отношений.

Многие отношения в базе знаний удовлетворяют свойствам рефлексивности, симметричности и транзитивности. Ниже приведен фрагмент базы знаний, описывающий свойства отношения на SCn-коде:

строгое включение*

∈ антирефлексивное отношение
∈ транзитивное отношение

Взяв в качестве примера вопрос суждения, генерируемый с помощью данной стратегии, можно записать его следующим образом: «Верно ли, что если множество А строго включается во множество В, а множество В строго включается во множество С, то множество А строго включается во множество С?». Поэтому данные отношения и их свойства используются для генерации объективных вопросов. Важно отметить, что как показано в данном примере, благодаря базе знаний система способна генерировать вопросы, проверяющие не только знания учащегося, но степень его понимания и способность применять эти знания при решении задач.

6. Стратегия генерации на основе примеров изображений.

В базе знаний хранятся некоторые понятия, отношения, теоремы и поясняющие их изображения, что позволяет автоматически генерировать некоторые объективные вопросы.

7. Стратегия генерации субъективных вопросов.

Определения понятий и доказательства теорем хранятся в базе знаний в соответствии с правилами представления знаний, поэтому процесс генерации субъективных вопросов можно разделить на следующие этапы:

1. Использование шаблонов логических формул для поиска определений некоторых понятий и доказательств некоторых теорем в базе знаний.

2. Найденные фрагменты баз знаний хранятся в соответствующей предметной области базы знаний подсистемы в соответствии с типом фрагмента (определение или доказательство).

3. Наконец, с использованием ручных или автоматических подходов для описания определения каждого конкретного понятия и процесса доказательства каждой конкретной теоремы на SCg-коде или SCL-коде (специальный подязык SC-кода, предназначенный для формализации логических формул) в соответствии с правилами представления знаний и с использованием отношения “стандартный ответ*” они связываются с соответствующими семантическими фрагментами [2, 6].

Вопросы, автоматически генерируемые с использованием перечисленных выше стратегий, могут содержать повторные и неправильные вопросы, поэтому для обеспечения качества генерируемых вопросов необходимо сначала сохранить эти автоматически генерируемые вопросы в базе знаний подсистемы автоматической генерации вопросов, а затем

использовать ручные или автоматические подходы (сравнение подобия между вопросами) для фильтрации повторных и неправильных вопросов. Основой базы знаний любой системы OSTIS является иерархическая система предметных областей и соответствующих им онтологий (онтология – это вид знаний, каждое из которых является спецификацией соответствующей предметной области, ориентированной на описание свойств и взаимосвязей понятий, входящих в состав указанной предметной области) [6]. Рассмотрим иерархию предметной области, используемой для хранения генерируемых вопросов в базе знаний подсистемы на SCn-коде.

Раздел. Предметная область вопросов

← декомпозиция раздела*:

- {
 - Раздел. Предметная область субъективных вопросов
 - ← декомпозиция раздела*:
 - {
 - Раздел. Предметная область вопросов на доказательство
 - Раздел. Предметная область вопросов на толкование теорем
 - Раздел. Предметная область вопросов на толкование определений
 - Раздел. Предметная область объективных вопросов
 - ← декомпозиция раздела*:
 - {
 - Раздел. Предметная область вопросов на заполнение пробелов
 - Раздел. Предметная область вопросов суждения
 - Раздел. Предметная область вопросов на выбор

Среди них объективные типы вопросов могут быть разложены на более конкретные типы в соответствии со стратегиями генерации вопросов и характеристиками каждого типа вопроса (например, вопросы на выбор включают в себя: вопросы на выбор с одним вариантом ответа и вопросы на выбор с несколькими вариантами ответа). На рис. 2 приведен семантический фрагмент классификации вопросов на выбор в предметной области вопроса на выбор на SCg-коде [2].

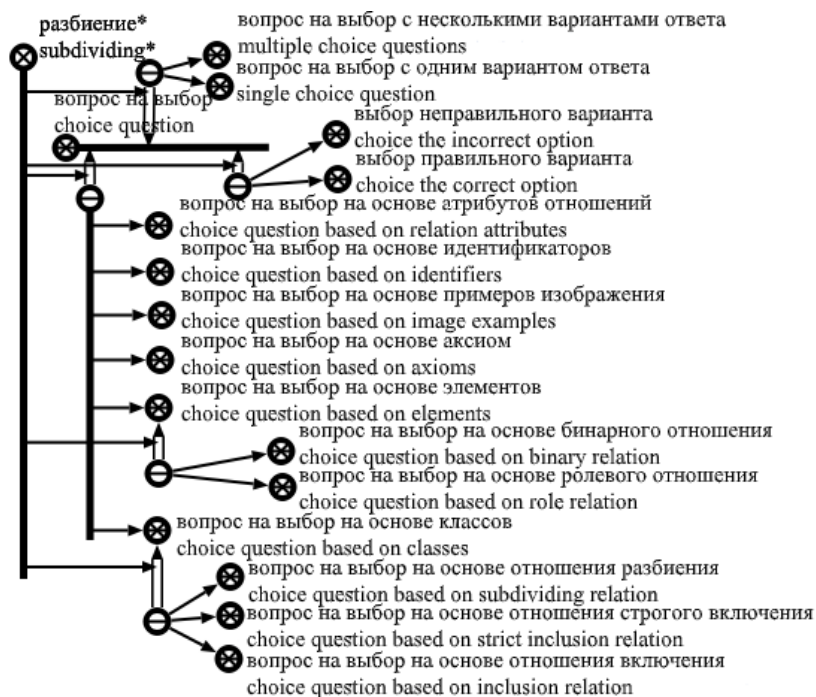


Рис. 2. Семантический фрагмент классификации вопросов на выбор
Fig. 2. Semantic fragment of multiple-choice question classification

Вопросы на выбор, автоматически генерируемые с помощью базы знаний, будут храниться в соответствующих разделах базы знаний подсистемы в соответствии с классификацией, приведенной на рисунке. Поскольку генерируемые вопросы хранятся в базе знаний подсистемы автоматической генерации вопросов в соответствии с типом вопросов, при тестировании пользователей системой из базы знаний подсистемы извлекаются вопросы определенных типов в соответствии с требованиями пользователей, что значительно повышает эффективность извлечения вопросов. В текущей версии методы поддержки извлечения вопросов включают в себя: извлечение требуемых типов вопросов в соответствии с количеством, извлечение требуемых типов вопросов в соответствии со стратегией генерации вопросов и случайное извлечение вопросов в соответствии с количеством.

Предложенный в данной работе подход к автоматической генерации вопросов и подход использования онтологии для хранения генерируемых вопросов имеют следующие преимущества:

– поскольку базы знаний, разработанные с использованием технологии OSTIS, имеют одинаковую структуру хранения знаний, предлагаемый подход для автоматической генерации вопросов может использоваться в других интеллектуальных системах, построенных по технологии OSTIS;

– сгенерированные вопросы выражаются с помощью унифицированного языка кодирования знаний SC-кода, поэтому они не зависят от естественного языка;

– используя подход, предложенный в данной работе, можно не только генерировать субъективные и объективные вопросы, но и повысить качество генерируемых вопросов.

Заключение

В данной работе анализируется состояние развития и преимущества ИОС, обсуждаются проблемы существующих подходов автоматической генерации вопросов. На основе объединения существующих подходов и технологии OSTIS предложен подход к автоматической генерации вопросов, который решает некоторые актуальные проблемы. Подсистема, разработанная с использованием предложенного подхода, обладает независимостью от естественного языка, и может широко использоваться в обучающих системах, построенных по технологии OSTIS.

Предложенные подходы к автоматической генерации вопросов и использованию онтологий для хранения сгенерированных вопросов позволяют устранить недостатки автоматической генерации вопросов, перечисленные в начале данной работы. Несмотря на то, что предложенный подход имеет ряд преимуществ, существует также ряд проблем, которые необходимо решить:

– контроль качества и частоты повторения автоматически генерируемых вопросов в онтологии вопросов;

– несоответствие набора терминов (имен понятий) при одинаковой системе понятий в разных источниках информации.

Следующим шагом является внедрение данной подсистемы в обучающую систему по дискретной математике.

Список литературы

1. Li H. Research on item automatic generation based on DL and domain ontology. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*. 2012;33(04):461-464. DOI: 1674-1374(2012)04-0460-05.
2. Голенков В.В., Гулякина Н.А. Проект открытой семантической технологии компонентного проектирования интеллектуальных систем. *Онтология проектирования*. 2014;1:42-64.
3. Li W., Grakova N.V., Qian L. Ontological approach to automating the processes of question generation and knowledge control in intelligent learning systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2020)*. 2020;4:215-224.
4. Ruslan M., Le N.H., Nikiforos K. A computer-aided environment for generating multiple-choice test items. *Natural Language Engineering*. 2006;12(02):177-194. DOI: 10.1017/S1351324906004177.

5. Andreas P., Konstantinos K., Konstantinos K. Automatic generation of multiple-choice questions from domain ontologies. *IADIS International Conference e-Learning*. 2008;1:427-434.
6. Golenkov V.V., Ivashenko V.P., Taberko V.V., Kroshchanka I.I. Integration of artificial neural networks and knowledge bases. *Ontology of designing*. 2018;29:366-386. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386.

References

1. Li H. Research on item automatic generation based on DL and domain ontology. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*. 2012;33(04):461-464. DOI: 1674-1374(2012)04-0460-05.
2. Golenkov V.V., Guljakina N.A. [Project of open semantic technology for component design of intelligent systems]. *Ontologija projektovanija = Ontology of designing*. 2014;1:42-64. (In Russ.)
3. Li W., Grakova N.V., Qian L. Ontological approach to automating the processes of question generation and knowledge control in intelligent learning systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2020)*. 2020;4:215-224.
4. Ruslan M., Le N.H., Nikiforos K. A computer-aided environment for generating multiple-choice test items. *Natural Language Engineering*. 2006;12(02):177-194. DOI: 10.1017/S1351324906004177.
5. Andreas P., Konstantinos K., Konstantinos K. Automatic generation of multiple-choice questions from domain ontologies. *IADIS International Conference e-Learning*. 2008;1:427-434.
6. Golenkov V.V., Ivashenko V.P., Taberko V.V., Kroshchanka I.I. Integration of artificial neural networks and knowledge bases. *Ontology of designing*. 2018;29:366-386. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386.

Сведения об авторе

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

Information about the author

Li Wenzu, PG Student of the Department of Intelligent Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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
Ли Вэньцзу

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-851-60-84;
e-mail: lwzzggml@gmail.com
Li Wenzu



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-53-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 628.52.012.011

ДИНАМИЧЕСКАЯ АСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА О НАЗНАЧЕНИИ В ОТКРЫТЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

РЕВОТЮК М.П., ХАДЖИНОВА Н.В., КУЗНЕЦОВ А.П., ШИЛИН Л.Ю.

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

Поступила в редакцию 13 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы – разработка моделей и алгоритмов оптимизации паросочетаний в динамически формируемых графах асимметричных отношений в координируемых открытых системах взаимодействующих агентов с централизованным и коллективным управлением. Динамическая асимметричная задача оптимизации паросочетаний здесь возникает как результат компромиссной аппроксимации отображения метода динамического программирования на поток известных открытых задач о назначении или нескольких странствующих коммивояжеров. Однако представленные таким образом альтернативы ветвления на независимых задачах не учитывают взаимозависимость реальных отношений между агентами и их заданиями, включая их привязку ко времени. Игнорирование зависимости альтернатив ветвления приводит к задержке момента или потере качества назначения заданий координируемым агентам. Основная идея предлагаемой реализации известного для эффективного управления принципа – откладывание момента принятия окончательного решения на наиболее поздний момент, учет восприимчивости системы к локальным изменениям переменных состояния. Взаимозависимость состояний выявляется на основе анализа соответствия графа текущего паросочетания оптимальному решению на подграфе совершенного паросочетания. Переход между состояниями реализуется инкрементальной версией алгоритма реоптимизации решения линейных задач о назначении методом кратчайшего пополняющего пути. Пространство состояний поиска – динамически формируемый двудольный разреженный граф альтернатив сочетания агентов и задач, представленный списком дуг. Для выделения множеств изменившихся дуг предложено дополнить веса дуг границами интервалов устойчивости решения, факультативно формируемых в фоновом режиме. По умолчанию вес измененной дуги совпадает с границей интервала устойчивости. На каждом цикле коррекции списков агентов, задач и их ассоциаций выделяются подмножества элементов, для которых требуется пересмотр паросочетания. Усиленное условие отбора таких элементов – выход за границы интервала устойчивости. При этом асимметрия задачи назначения учитывается выбором структуры смежности для доли графа с минимумом вершин. В результате время реакции процедур решения задачи назначения сокращается на порядок.

Ключевые слова: метод кратчайшего пополняющего пути, динамическая задача о назначении.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ревотюк М.П., Хаджинова Н.В., Кузнецов А.П., Шилин Л.Ю. Динамическая асимметричная задача о назначении в открытых многоагентных системах. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 53-61.

DYNAMIC ASYMMETRIC ASSIGNMENT PROBLEM IN OPEN MULTI-AGENT SYSTEMS

MIKHAIL P. REVOTJUK, NATALIA V. KHAJYNOVA, ALEXANDER P. KUZNETSOV,
LEONID Y. SHILIN

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

Submitted 13 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work is to develop models and algorithms for optimizing matching in dynamically generated graphs of asymmetric relations in coordinated open systems of interacting agents with centralized and collective control. The dynamic asymmetric matching optimization problem arises here as a result of a compromise approximation of the mapping of the dynamic programming method onto a stream of known open assignment problems or several traveling salesmen. However, the branching alternatives presented in this way for independent tasks do not take into account the interdependence of real relationships between agents and their tasks, including their relationship to time. Ignoring the dependence of branching alternatives leads to a delay in the moment or to a loss in the quality of assignment of tasks to coordinated agents. The main idea of the proposed implementation of the principle known for effective control is to postpone the moment the final decision is made to the latest moment, taking into account the susceptibility of the system to local changes in state variables. The interdependence of states is revealed on the basis of the analysis of the correspondence of the graph of the current matching with the optimal solution on the subgraph of perfect matching. The transition between states is implemented by the incremental version of the reoptimization algorithm for solving linear problems of assigning the shortest replenishing path using the method. The space of search states is a dynamically generated bipartite sparse graph of alternatives for a combination of agents and tasks, represented by a list of arcs. To highlight the sets of changed arcs, it is proposed to supplement the weight of the arcs with the boundaries of the stability intervals of the solution, optionally formed in the background. By default, the weight of the modified arc matches the boundary of the stability interval. On each correction cycle of the lists of agents, tasks, and their associations, subsets of elements are selected for which reconsideration of matching is required. An enhanced condition for the selection of such elements is to go beyond the boundaries of the stability interval. In this case, the asymmetry of the assignment problem is taken into account by choosing the adjacency structure for the fraction of the graph with a minimum of vertices. As a result, the reaction time of procedures for solving the assignment problem is reduced by an order of magnitude.

Keywords: shortest augmenting path method, dynamic assignment problems.

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

For citation. Revotjuk M.P., Khajynova N.V., Kuznetsov A.P., Shilin L.Y. Dynamic asymmetric assignment problem in open multi-agent systems. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 53-61.

Введение

Объект исследования – процессы управления системами взаимодействующих агентов. Под агентом будем понимать сущность, предназначенную для решения некоторых задач. Подобные системы в последнее время получают широкое распространение в промышленности, транспорте и других отраслях, характеризуются автономностью поведения агентов [1]. Основная функция управления в таких системах – координация взаимодействия агентов для обеспечения требуемых отношений в потоках решаемых задач.

Централизованный и коллективный подход к управлению – потенциально наиболее эффективные, но требуют решения задач повышенной вычислительной сложности [2]. Компромисс между точностью и своевременностью решения заключается в использовании различного рода аппроксимаций. Наиболее практичным оказывается прием отображения процедур оптимизации многошаговых дискретных процессов в системах агентов на множество

линейных задач о назначении. При этом веса связи агентов и задач представляют скалярную свертку локальных критериев с учетом неопределенности будущих событий. Некоторые параметры весов зависят от состояния системы, а в процессе построения дерева поиска оцениваются методом имитационного моделирования [2].

В ряде процедур оптимизации управления, например, методами динамического программирования, ветвей и границ, порождаемые варианты решения отличаются незначительными изменениями локальных переменных состояния. Очевидно, что отражение последствий таких изменений на целевую функцию приведет к ускорению поиска оптимального решения. Последнее является побудительным мотивом изучения способов формализации и решения задачи построения оптимального паросочетания агентов и решаемых ими задач с учетом возможности откладывания принятия окончательного решения на наиболее поздний момент.

Обсуждаемая далее динамическая асимметричная задача о назначении рассматривается в контексте потока событий координатора открытых многоагентных систем, решающих предопределенные общей целью взаимосвязанные во времени задачи. Динамика здесь соответствует появлению моментов формирования назначения агентов, необходимых и достаточных для решения целевого потока задач к определенному сроку. Неопределенность на этапе формирования назначения информации о доступных агентах и учет предложений о готовности к решению задач в будущем создает асимметрию отношений «агент – задача» на этапах выделения альтернатив поиска решений.

Методика решения задачи

Модель динамической задачи назначения. Построение оптимального паросочетания агентов из множества A и решаемых ими задач из множества T может быть выполнено в результате решения хорошо изученной линейной задачи о назначении (ЛЗН): для заданных оценок эффективности назначения $C: T \times A \rightarrow R^+$ найти паросочетание $X: T \rightarrow A$ минимального веса [3]. Пусть $|A|=m$, а $|T|=n$. В случае, когда $m=n$, ЛЗН в матричной формулировке

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \mid \sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; x_{ij} \geq 0; i, j = \overline{1, n} \right\} \quad (1)$$

может считаться рутинной задачей этапа реализации вычислительной схемы алгоритма, когда так называемые открытые ЛЗН [3, 4]

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \mid \sum_{i=1}^m x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \right\} \quad (2)$$

становятся частным случаем задачи (1) после формального дополнения матрицы C до размера $\max(m, n)$ нулевыми элементами. В случае необходимости поиска паросочетания $X: T \rightarrow A$ максимального веса, в выражении (1) достаточно произвести замену $c_{ij} \leftarrow c^* - c_{ij}, i, j = \overline{1, n}$, где $c^* = \max\{c_{ij}, i, j = \overline{1, n}\}$.

Открытые ЛЗН, решаемые процедурами без явного преобразования в (1) [4, 5], всегда следует рассматривать в условиях, когда $m \leq n$. Случай $m > n$ для отказа от необходимости перебора сочетаний строк легко сводится к решению (2) после реального или виртуального транспонирования матрицы C .

Вычислительная сложность решения ЛЗН с помощью одного из лучших среди известных модифицированного метода кратчайшего пополняющего пути (Shortest Augmenting Path, SAP) при применении алгоритма Дейкстры с кучей Фибоначчи имеет асимптотики от $O(n^{3/4} m \cdot \log c^*)$ до $O(\sqrt{nm} \cdot \log(nc^*))$ [3]. Отсюда следует, что время решения открытой ЛЗН

зависит прямо пропорционально от количества строк. Такая зависимость сохраняется и в случае реоптимизации назначения после коррекции некоторых строк матрицы статической ЛЗН [5].

Очевидно, что последнее утверждение открывает путь сокращения вычислительной сложности решения последовательно порождаемых ЛЗН, если учесть реально существующие связи между их матрицами. Отображение $X : T \rightarrow A$, формируемое в результате оптимизации паросочетания, предполагает рассмотрение связи задач и агента на состояниях «назначена – не назначена». В реальном времени множество перечисленных состояний предлагается дополнить состоянием «не рассмотрена», отражая появление в произвольный момент новых альтернатив связи задач и агента по отношению к оптимальному парасочетанию. Это позволяет отразить возможность согласованного представления формируемых отношений задач T и агентов A с представлением оптимального парасочетания. Согласование таких представлений будем проводить на основе выбора для определения исходных данных ЛЗН и пространства поиска решения динамически формируемых графов паросочетаний в форме списка дуг. Новые альтернативы связи задач и агента в момент их появления обуславливают необходимость пересмотра парасочетаний, решая ЛЗН с обновленными данными.

Очевидно, что в случае решения потока зависимых ЛЗН полный пересчет очередного варианта ЛЗН, например, венгерским методом, потребует $O(n^3)$ операций. Однако итерация учета изменений любой отдельной строки имеет вычислительную сложность $O(n^2)$ [5, 6].

После изменения Δm строк сложность пересчета – $O(\Delta m \cdot n^2)$, что характеризует полезность наследования результатов предшествующего решения. Наследование результатов улучшает реактивность системы координации, даже если до момента принятия решения о назначении не имеется полной информации об окончательной подлежащей решению задаче. Далее, на основе анализа оценок жесткости элементов парасочетаний будут рассмотрены приемы выделения минимально необходимого для точного решения очередной ЛЗН множества измененных строк.

Идея наследования результатов предшествующего решения неявно предлагалась в версии алгоритма решения ЛЗН на основе венгерского метода для случая, когда меняются элементы матрицы стоимости [6]. Известно, что наиболее эффективные для решения задачи (2) алгоритмы на основе метода пополняющего пути и их модификации учитывают особенности двойственной задачи

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m u_i + \sum_{j=1}^n v_j \mid c_{ij} - u_i - v_j \geq 0, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \right\}. \quad (3)$$

В этом случае наследуемые результаты решения открытых ЛЗН включают: сопряженные векторы назначений столбцов матрицы ее строкам и строк матрицы ее столбцам – $R = \{r_j = i \mid x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}\}$ и $Q = \{q_i = j \mid x_{ij} = 1, i = \overline{1, m}\}$;

векторы потенциалов строк и столбцов – $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ и $V = \{v_j, j = \overline{1, n}\}$.

Наличие пар векторов формально создает избыточность наследуемых результатов:

$r_{q_i} = i, i = \overline{1, m}$ и $q_{r_j} = j, j = \overline{1, n}$ – по определению, но их наличие позволяет исключить операции поиска альтернатив расширения пополняющих путей;

$u_i + v_j = c_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ – известное условие жесткости элементов оптимального парасочетания (в методе SAP используется для сокращения размера пространства состояния).

Указанная избыточность позволяет обеспечить выбор направления отображения $A \leftrightarrow T$, включая виртуальное транспонирование матрицы C , после выявления нарушения условия $m \leq n$. Переключение направления отображения посредством замены ссылок исключает операции копирования переменных состояния решения последовательно возникающих ЛЗН. Сложность подобной операции – $O(m + n)$, что в ряде случаев может стать практически значимым при большом количестве атрибутов отношения $A \leftrightarrow T$ [1, 2].

Алгоритм динамического назначения. Предлагается для оптимизации динамического назначения модифицировать известный инкрементальный алгоритм решения статических ЛЗН [6]. Модификация состоит в замене оригинальной процедуры итерации венгерского метода

процедурой расширения кратчайшего пополняющего пути метода SAP и применении такой процедуры после добавления новой или коррекции существующей строки $i, i \in \overline{1, m}$ текущего паросочетания [5, 7]. Для случая решения динамической ЛЗН вида (3) эвристический этап инициализации начального назначения, обычно предлагаемый многими авторами для решения (1) [3], может быть исключен (рис. 1).

```
function SLAP() {
  foreach  $j \in \overline{1, n}$  {  $r_j = 0, v_j = 0;$  }
  foreach  $i \in \overline{1, m}$  sap( $i$ );
}
```

Рис. 1. Алгоритм решения открытой ЛЗН методом SAP

Fig. 1. The algorithm for solving Open Linear Assignment Problem using the SAP method

Обозначим для каждой вершины x графа множество смежных выходных вершин x' , $x' = \{y \mid x \rightarrow y\}$, а входных вершин – $'x$, $'x = \{x \mid x \rightarrow y\}$, где $x \rightarrow y$, $x, y \in A \cup T$. Итерации назначения строк методом SAP реализует функция sap (рис. 2). Такая функция обеспечивает формирование наследуемых на других этапах векторов U , V , Q и R .

```
function sap( $i$ ) {
  foreach  $j \in i'$  {  $p_j = i, d_j = c_{ij} - v_j;$  }
   $K = \emptyset, S = \emptyset, T = \{i'\};$ 
  while (true) {
    if ( $|S| = 0$ ) {
       $h = \min\{d_j \mid j \in T\};$ 
       $S = \{j \mid (d_j = h) \wedge (j \in T)\}; T \leftarrow T \setminus S;$ 
      foreach  $j \in S$  if ( $r_j = 0$ ) go to back;
    }
     $k = S_1, S \leftarrow S \setminus \{k\}, K \leftarrow K \cup \{k\}, l = r_k;$ 
    foreach  $j \in T$  if ( $h + c_{lj} - v_j < d_{lj}$ ) {
       $d_j = h + c_{lj} - v_j; p_j = l;$ 
      if ( $d_j = h$ ) {
        if ( $r_j = 0$ ) go to backtrack;
         $S \leftarrow S \cup \{j\}, T \leftarrow T \setminus \{j\};$ 
      }
    }
    backtrack: foreach  $k \in K$   $v_k \leftarrow v_k + d_k - h;$ 
    do {  $l = p_j; r_j = l; k = j; j = q_l; q_l = k;$  } while ( $i \neq l$ );
  }
}
```

Рис. 2. Алгоритм итерации назначения методом SAP

Fig. 2. Algorithm of SAP Assignment Iteration

Графы реальных ЛЗН чаще всего разреженные, а с учетом удобства отражения их изменчивости во времени предпочтительная форма их представления – список дуг. Изменение таких графов также будем представлять списком дуг. В результате объединения на очередном шаге k получаем новый граф, в котором множество исходных вершин представляет множество агентов A^k , а множество конечных вершин – множество подлежащих решению задач T^k .

Пусть на любом этапе k имеем $m = |A^k|$, а $n = |T^k|$. Очевидно, что истинность условия $m \leq n$ определяет необходимость поиска паросочетания на задаваемом структурой смежности отображении $FS: A \rightarrow T$, $FS = \{(x, x'), x \in A\}$, а в противном случае – на отображении $BS: T \rightarrow A$, $BS = \{(y, 'y), y \in T\}$. Отображения FS и BS создаются для формирования соответствующих отношений на списке дуг (x, y, c_{xy}) , $x \in A$, $y \in T$. В любом случае ключевые элементы выбранного отношения будут соответствовать строкам открытой ЛЗН (2). Итерации

назначения (рис. 2) в случае $m \leq n$ необходимо выполнять по элементам $\{U, R, FS\}$. В случае $m > n$ роль строк должны исполнять элементы $\{V, Q, BS\}$.

Обозначим G^k – заданный в форме списка дуг граф допустимых на этапе k сочетаний агентов и задач, где дуги представляют тройки (x, y, c_{xy}) , $x \in A^k$, $y \in T^k$.

Пусть ΔG^k – список изменяемых, добавляемых или удаляемых дуг, структура которого совпадает со структурой графа G^k . На следующем шаге новый список получим как результат операции $G^{k+0} = G^k \cup \Delta G^k$, где объединение выполняется с группированием пар (x, y) с целью однозначности ассоциации $x \leftrightarrow y$. Отсюда следует алгоритм выделения подлежащих реоптимизации строк, формирующий стек K номеров таких строк на этапе выполнения операции присваивания новых весов $\Delta m = |K|$ дуг:

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \emptyset; \\ \text{foreach}((i, j, c_{ij}) \in \Delta G^k) \{ \\ \quad \text{if} (c_{ij}^k \neq c_{ij}) \{ \\ \quad \quad \text{if} (I(i) \neq k) \{ \\ \quad \quad \quad K \leftarrow K \cup \{i\}, I(i) \leftarrow k; \\ \quad \quad \quad \} \\ \quad \quad \} \\ \quad \quad c_{ij}^{k+1} \leftarrow c_{ij}; \\ \quad \} \\ \text{foreach}(i \in K) \text{ sap}(i); \end{array} \right. \quad (4)$$

Изменяемые строки помечены номером этапа k в глобальном массиве I , поэтому вычислительная сложность выделения строк – $O(\Delta m)$. Алгоритм (4) можно дополнить операциями выделения измененных столбцов в соответствующем глобальном массиве J .

Фильтрация несущественных событий. Можно заметить, что анализ в (4) лишь фактов изменения весов дуг можно дополнить количественной оценкой влияния такого изменения на существующее на этапе k паросочетание, если для каждой дуги получить интервалы устойчивости оптимального решения [7, 8]. Очевидно, что контроль на этапе $k+0$ условия выхода веса дуг за границы – $c_{ij}^{k+0} \notin \{(a_{ij}^k, b_{ij}^k), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}$ – позволяет легко распознать необходимость перестройки паросочетаний агентов из множества $A_k = \{i \mid c_{ij}^k < \infty, j = \overline{1, n}\}$ и задач из множества $T_k = \{j \mid c_{ij}^k < \infty, i = \overline{1, m}\}$. Элементы $A_k \times T_k$ определяют область возмущения текущего решения, которая должна быть учтена процедурой координации системы агентов [2].

Покажем далее, что наличие таких интервалов сокращает размерность стека K , не меняет порядок вычислительной сложности реоптимизации, а их определение может выполняться в фоновом режиме. По умолчанию интервал устойчивости тривиально отображает существующий вес дуг – $(a_{ij}^k = c_{ij}^k, b_{ij}^k = c_{ij}^k), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$.

Пусть на этапе k выделены ребра графа оптимального паросочетания $E_m = \{(r_j, j) \mid r_j < n, j = \overline{1, n}\}$, а оставшиеся ребра возможных паросочетаний обозначены как $E_u = \{(i, j), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\} \setminus E_m$. По определению $E_m \cap E_u = \emptyset$ и $E_m \cup E_u = E$. Отсюда следует, что $|\{(a_{ij}^k, b_{ij}^k), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}| = |E|$.

Обозначим $\delta_m(x, y)$ и $\delta_u(x, y)$ – допустимое изменение веса любого ребра $x \rightarrow y$ во множествах соответственно E_m и E_u . Интервалы допустимых изменений значений весов ребер, в которых результат оптимизации назначения остается неизменным, для ЛЗН вида (1) просто вывести из элементарных рассуждений:

$$I_{\min}^m(x, y) = (-\infty, c_{xy} + \delta_m(x, y)], (x, y) \in E_m, \quad I_{\min}^u(x, y) = (c_{xy} - \delta_u(x, y), +\infty], (x, y) \in E_u.$$

Действительно, ребро графа $x \rightarrow y$ покинет оптимальное паросочетание, если его вес увеличить назначением любого значения из интервала $(c_{xy} + \delta_m(x, y), +\infty)$.

Идея определения $\delta_m(x, y)$ основана на известном для элементов оптимальном условии жесткости $c_{xy} = u_x + v_y$, $(x, y) \in E_m$. Пусть элементы выражения для оценки текущего оптимального решения ЛЗН выделены верхним индексом m :

$$Z^m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^m x_{ij}^m = \sum_{i=1}^m u_i^m + \sum_{j=1}^n v_j^m. \quad (5)$$

Нетрудно показать, что если изменить вес ребра $x \rightarrow y$, $(x, y) \in E_m$, то итерации процесса реоптимизации на основе метода пополняющего пути (рис. 2), начинающиеся в вершине x , всегда завершатся в вершине y [5]. При этом меняется лишь потенциал строки x , а в соответствии с (5) $u_x^u - u_x^m = Z^u - Z^m$. Здесь верхним индексом u отмечен факт исключения ребра $x \rightarrow y$ из оптимального паросочетания после замены $c_{xy}^m \leftarrow c_{xy}^u = \infty$. Отсюда следует, что $\delta_m(x, y) = Z^u - Z^m$, а интервал безопасного изменения значений веса назначенного ребра:

$$I_{\min}^m(x, y) = (-\infty, c_{xy} + Z^u - Z^m] = (-\infty, c_{xy} + u_x^u - u_x^m], (x, y) \in E_m. \quad (6)$$

Суммирование приращений потенциалов строк для всех этапов k исключает необходимость прямолинейного вычисления оценок решений задачи (1), требующего $m+n$ шагов. Последнее важно для эффективной реализации операций отсечения альтернатив поиска в процедурах, например, прямого динамического программирования.

Рассмотрим далее ребра, не принадлежащие оптимальному решению, когда $c_{xy} \leq u_x + v_y$, $(x, y) \in E_u$. Если вес таких ребер менять в интервале $(u_x + v_y, +\infty)$, то структура решения (2) остается неизменной. Используя линейность целевой функции (2), для определения $\delta_u(x, y)$ можно воспользоваться выражением (6). Предлагается просто поменять направление шагов процесса, рассматривая условие включения ребра $x \rightarrow y$ в оптимальное паросочетание. Начальный шаг в (6) становится решением ЛЗН с обязательным для назначения ребра $x \rightarrow y$ значением веса $c_{xy}^u \leftarrow c_{xy}^m = -\infty$, а конечный шаг будет соответствовать решению ЛЗН с исходной матрицей. Таким образом, получаем

$$I_{\min}^u(x, y) = (-\infty + Z^m - Z^u, +\infty] = (-\infty + u_x^m - u_x^u, +\infty], (x, y) \in E_u. \quad (7)$$

Результат итераций метода SAP (рис. 2) содержит лишь значение потенциала столбца, но пригоден для определения $I_{\min}^m(x, y)$ и $I_{\min}^u(x, y)$, так как значение потенциала строки можно представить в виде $u_x = v_y - c_{xy}$, $(x, y) \in E_m$. Очевидно, что так как $|E_m| = m$, а $|E_u| = m \cdot (n-1)$, то вычислительная сложность реализации (6) и (7) – $O(n^4)$.

Определение интервалов устойчивости может проводиться в фоновом режиме. При этом, назначая порядок рассмотрения отдельных дуг, целесообразно использовать в качестве оценки относительного приоритета значения их веса. На переходных этапах оптимизации паросочетаний необходимо использовать (5). При наличии интервалов устойчивости условие $(c_{ij}^k \neq c_{ij})$ в (4) может быть усилено проверкой условия $c_{ij} \notin (a_{ij}, b_{ij})$, что снижает сложность перестройки решения.

Отказ от перестройки паросочетаний возможен при появлении новой альтернативы связи $x \rightarrow y$, когда на этапе k выполняется $(x \notin A^k) \vee (y \notin T^k)$. Такая связь не обязательно должна рассматриваться, если $c_{xy} > \min(b_{iy}, i \in' y)$ или $c_{xy} > \min(a_{xj}, j \in' x)$.

Результаты и их обсуждение

Рассмотренная задача о динамическом назначении отражает дискретность процесса формирования портфелей предложенных услуг и заявок на обслуживание в многоагентных системах, используя жадный инкрементальный алгоритм решения задачи упреждающего поиска окончательного назначения. Очевидно, что в худшем случае, когда приходится изменять граф оптимального паросочетания при поступлении последней группы новых заявок, задержка времени принятия окончательного решения определяется лишь сложностью ее обработки. Как следствие, система координации решения задач способна до последнего момента учесть вновь возникающие альтернативы назначения. Такая возможность становится привлекательной в системах безропотных агентов с беспилотным управлением.

Предложенные структуры данных представления пространства состояния, алгоритмы локализации области возмущений и оценки интервалов устойчивости позволяют снизить вычислительную сложность обработки последствий перехода в новое состояние до линейной зависимости от количества изменившихся ассоциаций задач и агентов. Последнее становится важным при использовании ЛЗН для релаксации на итерациях процедур, например, динамического программирования, ветвей и границ, простого или направленного перебора [2–4, 6]. Время проведения отдельных итераций экспоненциально сложных комбинаторных алгоритмов иногда можно сократить отображением зависимости решаемых агентами задач на потоки порождаемых ЛЗН. Однако при этом следует контролировать нарушения принципа независимости ЛЗН от предыстории.

Заключение

Полученные модели и алгоритмы поиска и пересмотра оптимального паросочетания определяют границы области возмущения текущего назначения агентов подлежащим решению задачам. Их наличие позволяет усилить логические условия отказа от итераций пересмотра решения при несущественных изменениях параметров внешней среды, что ускоряет реакцию системы управления на обработку информации о состоянии агентов и задач, обеспечивая полноту учета альтернатив оптимизации назначения в реальном времени.

Список литературы

1. Korsah G.A., Stentz A., Dias M.B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation. *The International Journal of Robotics Research*. 2013;12(32):1495-1512.
2. Spivey M.Z., Powell W.B. The Dynamic Assignment Problem. *Transportation science*. 2004;38(4):399-419.
3. Pentico D.W. Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*. 2007;176(2):774-793.
4. Bijsterbosch J., Volgenant A. Solving the Rectangular assignment problem and applications. *Annals of Operations Research*. 2010;181(1):443-462.
5. Ревотюк М.П., Батура П.М., Полоневич А.М. Реоптимизация решения задач о назначении. *Доклады БГУИР*. 2011;1(55):55-62.
6. Toroslu I.H., Üçoluk G. Incremental assignment problem. *Information Science*. 2007;177:1523-1529.
7. Ревотюк М.П., Кароли М.К., Батура П.М. Реализация метода ветвей и границ для решения задач коммивояжера с разреженными матрицами. *Доклады БГУИР*. 2013;7(77):25-31.
8. Ревотюк М.П., Кароли М.К., Батура П.М. Быстрая оценка интервалов устойчивости решения линейных задач о назначении. *Доклады БГУИР*. 2013;5(75):30-36.

References

1. Korsah G.A., Stentz A., Dias M.B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation. *The International Journal of Robotics Research*. 2013;12(32):1495-1512.
2. Spivey M.Z., Powell W.B. The Dynamic Assignment Problem. *Transportation science*. 2004;38(4):399-419.
3. Pentico D.W. Assignment problems: A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*. 2007;176(2):774-793.

4. Bijsterbosch J., Volgenant A. Solving the Rectangular assignment problem and applications. *Annals of Operations Research*. 2010;181(1):443-462.
5. Revotjuk M.P., Batura P.M., Polonevich A.M. [Reoptimization of the linear assignment problem]. *Doklady BGUIR=Doklady BSUIR*. 2011;1(55):55-62. (In Russ.)
6. Toroslu I.H., Üçoluk G. Incremental assignment problem. *Information Science*. 2007;177:1523-1529.
7. Revotjuk M.P., Qaraleh M.K., Batura P.M. [Implementation the branch and bound method for solving the traveling salesman problem with sparse matrix]. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 2013;7(77):25-31. (In Russ.)
8. Revotjuk M.P., Qaraleh M.K., Batura P.M. [Quick evaluation of the interval stability of the linear assignment problem solutions]. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 2013;5(75):30-36. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Ревотюк М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Хаджинова Н.В., старший преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кузнецов А.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры систем управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шилин Л.Ю., д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий и управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Revotjuk M.P., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Technologies in Automated Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Khajynova N.V., Senior Lecturer of Information Technologies in Automated Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kuznetsov A.P., D.Sci., Professor, Professor of Control Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shilin L.Y., D.Sci., Professor, Dean of Faculty of Information Technologies and Control of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Ревотюк Михаил Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Revotjuk Mikhail Pavlovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-62-70>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 616.831-009.81:303.052

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ КИНЕМАТИКИ В СТРУКТУРЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ АДАПТАЦИЙ

ЛУКАШЕВИЧ В.А.¹, ПОНОМАРЕВ В.В.¹, МИЦКЕВИЧ В.Е.², ГУБКИН С.В.³,
ГАВРИЛОВИЧ Ю.А.², ЖУРКО Е.А.², КИПЕЛЬ А.Н.²

¹ Белорусская медицинская академия последипломного образования (г. Минск Республика Беларусь)

² Парк высоких технологий, унитарное предприятие «ВРТЭК» (г. Минск Республика Беларусь)

³ Институт физиологии НАН Беларуси (г. Минск Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 2 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью исследования являлась разработка методики оценки состояния двигательной адаптации на уровне основных суставных элементов локомоторной системы при выполнении постральных девиаций с инерциальными компонентами в группе здоровых добровольцев ($n=24$). Для проведения исследования использовалась технология «умного» костюма «Teslasuit» с системой инерциальных измерительных сенсоров. На основе полученных кватернионов выполнялась реконструкция виртуальной скелетной модели тела испытуемого с последующим расчетом угловых ускорений для каждого направления пространственного перемещения с последующим частотным преобразованием и выделением показателей инерциальной кинематики в частотных полосах 0,1–5, 6–10 и 11–15 Гц. Для оценки двигательных адаптивных реакций были разработаны тестовые задания: тест латеро-латеральных девиаций, тест вентро-дорзальных девиаций, тест аксиальных ротаций вокруг вертикали, тест линейных перемещений по вертикали. Все тестовые задания выполнялись с применением биологически-обратной связи. Проведенное исследование выявило наличие универсальных механизмов регуляции двигательной адаптации с активацией компонентов осевых ротаций туловища и осевых ротаций и сгибаний ведущего плечевого сустава. Вместе с этим обеспечение динамической фазы постральной регуляции при осевых ротациях и наклонах туловища приводит к активации механизмов двигательной адаптации со стороны ведущего тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, при этом аксиальные перемещения формируют картину кинематической стабилизации данных элементов локомоторной системы.

Ключевые слова: двигательная адаптация, инерциальная кинематика, клиническая биомеханика, технология «Teslasuit», адаптивная кинезитерапия, постральное тестирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лукашевич В.А., Пономарев В.В., Мицкевич В.Е., Губкин С.В., Гаврилович Ю.А., Журко Е.А., Кипель А.Н. Феноменология инерциальной кинематики в структуре формирования двигательных адаптаций. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 62-70.

PHENOMENOLOGY OF INERTIAL KINEMATICS IN THE STRUCTURE OF FORMING MOTOR ADAPTATIONS

ULADZISLAU A. LUKASHEVICH¹, ULADZIMIR U. PONOMAREV¹,
ULADZISLAU E. MITSKEVICH², SIARHEY V. GUBKIN³, YURY A. GAVRILOVICH²,
YAUHEN A. ZHURKO², ARTUR N. KIPEL²

¹ *Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (Minsk, Republic of Belarus)*

² *High-Tech Park, Unitary Enterprise "VRTEK" (Minsk, Republic of Belarus)*

³ *Institute of Physiology, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 2 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The aim of the study was to develop a methodology for assessing the state of motor adaptation at the level of the main joint elements of the locomotor system when performing postural deviations with inertial components in a group of healthy volunteers ($n=24$). To conduct the study we used the "Teslasuit" smart suit as a technology with a system of inertial measuring units. A virtual skeletal model of the subject's body was reconstructed on the obtained quaternions for each direction of spatial displacement. Parameters of inertial kinematic were calculated by the Fast Fourier Transform in the frequency bands of 0.1–5, 6–10, and 11–15 Hz. To assess motor adaptive reactions, we developed the following tests: ventrodorsal displacement test; laterolateral displacement test; linear displacement test in vertical direction; axial rotation test around vertical. All test tasks were performed using biofeedback as a virtual reality environment. The study revealed the presence of universal motor adaptation mechanisms with activation of the components of axial rotation of the trunk and axial rotation and flexion of the leading shoulder joint. At the same time, a dynamic phase of postural regulation during axial rotations and tilts of the body leads to the activation of motor adaptation mechanisms from the leading hip, knee, and ankle joints, while axial movements form a picture of the kinematic stabilization of these locomotor system elements.

Keywords: motor adaptation, inertial kinematics, clinical biomechanics, "Teslasuit" technology, adaptive kinesitherapy, postural testing.

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

For citation. Lukashevich U.A., Ponomarev U.U., Mitskevich U.E., Gubkin S.V., Gavrilovich Y.A., Zhurko E.A., Kipel A.N. The phenomenology of inertial kinematics in the structure of forming motor adaptations. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 62-70.

Введение

Клиническая биомеханика (КБ) является прикладным направлением изучения различного рода нарушений нейромышечных скелетных и связанных с движением функций (НССДФ), а также специфических механизмов приспособления локомоторной системы (ЛС) к двигательному дефекту [1]. Несмотря на это, практическое применение КБ ограничивается анализом кинематики отдельных элементов, сингулярная функция которых в общей картине функционирования ЛС зачастую остается нераскрытой [2]. Так, большинство исследований посвящено анализу пространственно-временной кинематики [3]. В то же время, по мнению ряда авторов, в КБ сложных движений с резкими изменениями направлений особое место занимают механизмы обеспечения ускорений [4], оценка которых, как правило, выполняется при расчете угловых ускорений, что не отражает в полной мере уровень формирования двигательных адаптаций (ДА). Также в КБ основным методом исследования остается анализ шаговой локомоции, а провокационные поструральные тесты не имеют стандартизированной клинической методологии [5]. Таким образом, актуальным вопросом КБ является разработка методики комплексной оценки НССДФ при формировании ДА на различных уровнях ЛС.

Целью исследования являлась разработка методики оценки состояния ДА на уровне основных суставных элементов (СЭ) ЛС при выполнении поструральных девиаций с инерциальными компонентами в группе здоровых добровольцев.

Методика проведения эксперимента

Исследование одобрено этическим комитетом ГУО «Белорусская медицинская академия последиplomного образования». В нем приняли участие 24 добровольца с правосторонним ведущим кинематическим звеном (ВКЗ), в возрасте от 20 до 45 лет ($30,6 \pm 9,1$ лет). Гендерное соотношение количества мужчин к количеству женщин составляло 15:9. Антропометрические параметры имели следующий вид: рост $175,5 \pm 6,1$ см, масса тела $72,9 \pm 7,8$ кг.

Все участники исследования подписывали информированное согласие. Перед исследованием каждому испытуемому проводилось мануальное тестирование активной резистивной и пассивной суставной подвижности с определением объема суставной кинематики тазобедренных суставов и силы мышечных сокращений.

Критериями включения в исследование являлись: возраст от 20 до 40 лет; индекс массы тела от 18,6 до 30; желание принимать участие в эксперименте.

Критериями исключения были: наличие судорожного синдрома в анамнезе в течение последних 7 лет; жалобы на головокружение в течение последнего года; болевой синдром любой степени выраженности, локализации и генеза, имеющий место на момент проведения исследования; ограничение активной и пассивной суставной подвижности в тазобедренных суставах; снижение мышечной силы в пояснично-подвздошных, ягодичных, четырехглавых мышц и мышц задней группы бедра, а также передней и задней большеберцовых и малоберцовых мышц; отказ от участия в исследовании.

Для достижения поставленной цели была разработана группа тестов, выполняемых в вертикально ориентированном положении тела: 1) тест латеро-латеральных девиаций (ТЛЛД) – перемещения тела в стороны во фронтальной плоскости; 2) тест вентро-дорзальных девиаций (ТВДД) – отклонения тела в сагиттальной плоскости вперед и назад; 3) тест аксиальных ротаций вокруг вертикали (ТАРВ) – приседания; 4) тест линейных перемещений по вертикали (ТЛПВ) – повороты тела в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси. Данные тесты составили диагностическую батарею пострурального тестирования (ДБПТ).

Выполнение ДБПТ предусматривает использование «умного» костюма «Teslasuit» (производства компании «ВРТЭК», Республика Беларусь), связанного по каналу Wi-Fi с виртуальной средой тестирования. В костюме «Teslasuit» интегрированы инерциальные измерительные сенсоры (ИИС). На рис. 1 представлена схема расположения ИИС в области плечей (№ 1), предплечий (№ 2), кистей (№ 3), бедер (№ 4), голени (№ 5), стоп (№ 6), а также грудного (№ 7) и поясничного (№ 8) отделов позвоночника.

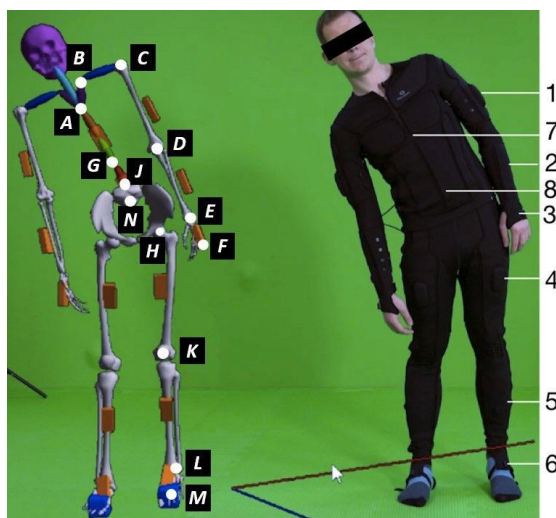


Рис. 1. Схема реконструкции виртуальной скелетной модели тела человека
Fig. 1. Scheme of reconstruction of virtual skeletal model of the human body

Анализ инерциальной кинематики выполнялся по угловым ускорениям ($\text{рад}/\text{с}^2$) суставов виртуальной скелетной модели тела испытуемого (частота дискретизации данных составляла 30 Гц), выполненной на основе программного продукта «OpenSim» (открытая платформа серии 4,1) с внесением собственных изменений и собственной процедурой калибровки, с реконструкцией основных анатомических ориентиров (отображены на рис. 1): *A* – V грудной позвонков; *B* – внутренний угол лопатки; *C* – плечевой сустав; *D* – локтевой сустав; *E* – лучезапястный сустав; *F* – кисть; *G* – позвоночно-двигательный сегмент XII грудного и I поясничного позвонков; *J* – позвоночно-двигательный сегмент V поясничного и I крестцового позвонков; *H* – тазобедренный сустав; *K* – коленный сустав; *L* – голеностопный сустав; *M* – стопа; *N* – копчик. Ориентиры объединялись между собой в релевантные углы (рис. 1): *AGJ* – кинематическое сочленение грудного и поясничного отделов позвоночника; *GJN* – кинематическое сочленение поясничного отдела позвоночника и таза; *NHK* – тазобедренный сустав; *HKL* – коленный сустав; *KLM* – голеностопный сустав; *ABC* – кинематическое сочленение верхнего плечевого пояса справа; *BCD* – плечевой сустав. Данные углы являлись исследуемыми СЭ.

Полученные данные подвергались дискретному преобразованию Фурье с разделением спектра на частотные полосы (ЧП): 0,1–5 Гц (ЧП1), 6–10 Гц (ЧП2) и 11–15 Гц (ЧП3). Затем рассчитывались показатели инерциальной кинематики (ПИК) в виде медианы (*Me*), верхнего (*UQ*) и нижнего (*LQ*) квартилей для каждой ЧП.

Каждый ПИК включает три определителя. Первый определитель обозначает СЭ: 1 – кинематическое сочленение грудного и поясничного отделов позвоночника; 2 – кинематическое сочленение поясничного отдела позвоночника и таза; 3 – правый тазобедренный сустав; 4 – левый тазобедренный сустав; 5 – правый коленный сустав; 6 – левый коленный сустав; 7 – правый голеностопный сустав; 8 – левый голеностопный сустав; 9 – кинематическое сочленение верхнего плечевого пояса справа; 10 – кинематическое сочленение верхнего плечевого пояса слева; 11 – правый плечевой сустав; 12 – левый плечевой сустав.

Второй определитель обозначает вид движения (ВД): 1 – сгибание / разгибание; 2 – отведение / приведение; 3 – осевые ротации; 4 – латеральные отклонения в стороны; 5 – вентральные и дорзальные отклонения; 6 – краниальные / каудальные перемещения.

Третий определитель отражает спектральную полосу: 1 – ЧП1; 2 – ЧП2; 3 – ЧП3.

Все тестовые задания ДБПТ выполнялись с применением биологической обратной связи. Испытуемому на экране монитора предлагалось совершить совмещение виртуального управляемого объекта (ВУО) с движущимся объектом-мишенью. Положение ВУО на мониторе контролировалось за счет перемещений собственного тела. Время выполнения каждого тестового задания составляло 30 с.

Статистическую обработку данных выполняли в пакете Statistica 12.6 (разработчик – «Dell», США). После оценки нормальности распределения для данных, не соответствующих нормальности, применяли непараметрические статистические методы. Критерием достоверности принималось значение $p \leq 0,05$. Параметрические данные представляли в виде среднего арифметического со стандартным отклонением, непараметрические – в виде $Me[UQ/LQ]$. Обработка массивов данных, получаемых от ИИС, с последующим преобразованием Фурье и вычислением ПИК выполнялась при помощи языка программирования «Python» (разработчик: «Python Software Foundation», США) с использованием инструментария библиотек SciPy и Pandas.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены ПИК суставных элементов локомоторной системы при выполнении ДБПТ.

Из таблицы следует, что при выполнении ДБПТ имеют место статистически значимые отличия между ПИК ЧП, относящихся к одному блоку ВД. При этом ПИК в ЧП3 является достоверно большим в сравнении с ЧП2 и ЧП1, а ПИК в ЧП1 достоверно меньшим в сравнении с ЧП2 и ЧП3.

Таблица 1. Показатели инерциальной кинематики суставных элементов при выполнении диагностической батареи пострурального тестирования
Table 1. Indicators of inertial kinematics of joint elements evaluated after implementing a diagnostic battery of postural testing

СЭ (JE)	ВД (TM)	ЧП (FL)	ТВДД (VDDT)			ТЛД (LLDT)			ТЛПВ (LDTV)			ТАРВ (ARTV)		
			LQ	Me	UQ	LQ	Me	UQ	LQ	Me	UQ	LQ	Me	UQ
1	4	1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	0,3	0,5
		2	0,4	0,9	1,5	0,4	0,8	1,5	0,4	0,8	1,3	0,6	1,1	2,0
		3	0,8	1,7	2,9	0,7	1,5	2,5	0,6	1,3	2,3	0,8	1,8	3,0
	3	1	0,1	0,3	0,6	0,1	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,4	0,9	1,5
		2	0,5	1,0	1,7	0,5	0,9	1,5	0,4	0,8	1,3	1,2	2,6	4,5
		3	0,7	1,5	2,8	0,7	1,4	2,3	0,6	1,3	2,3	1,6	3,4	5,8
	1	1	0,1	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	0,9
		2	0,6	1,5	2,6	0,4	0,9	1,7	0,4	1,0	1,7	0,7	1,4	2,4
		3	1,0	2,1	3,4	0,8	1,7	2,9	0,8	1,4	2,6	1,2	2,3	3,8
2	4	1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,5
		2	0,4	0,9	1,5	0,4	0,8	1,5	0,4	0,8	1,3	0,5	1,1	2,0
		3	0,8	1,7	2,9	0,7	1,5	2,5	0,7	1,3	2,3	0,8	1,8	3,1
	3	1	0,1	0,3	0,6	0,1	0,3	0,5	0,1	0,2	0,4	0,4	0,9	1,5
		2	0,5	1,0	1,7	0,4	0,9	1,5	0,4	0,8	1,3	1,2	2,6	4,5
		3	0,7	1,6	2,8	0,6	1,4	2,3	0,6	1,3	2,2	1,6	3,4	5,8
	1	1	0,1	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	0,9
		2	0,6	1,5	2,6	0,4	0,9	1,7	0,4	1,0	1,7	0,7	1,4	2,4
		3	1,0	2,1	3,4	0,8	1,7	2,9	0,8	1,4	2,6	1,1	2,3	3,8
3	1	1	1,6	3,6	6,4	0,7	1,5	2,5	1,3	2,8	5,1	1,0	2,1	3,7
		2	4,6	10,1	17,9	1,8	4,0	7,4	3,9	7,8	12,5	2,3	4,7	8,0
		3	5,9	13,2	22,1	2,8	5,3	9,2	4,6	9,6	17,0	3,5	7,2	12,3
	2	1	0,6	1,2	2,1	0,5	1,1	2,0	0,3	0,7	1,4	0,6	1,4	2,3
		2	1,5	3,1	5,4	1,8	3,9	6,7	1,2	2,5	4,8	1,9	3,9	6,6
		3	2,4	5,1	8,6	2,3	5,2	9,0	1,7	3,6	6,6	2,9	5,8	9,3
	3	1	0,8	2,0	3,8	0,6	1,4	2,7	0,5	1,0	1,9	1,8	4,4	8,0
		2	2,2	4,6	7,4	1,5	3,5	5,7	1,2	2,7	4,5	8,2	16,1	28,7
		3	2,7	6,0	10,6	2,3	4,7	7,6	1,5	3,9	6,8	9,2	22,0	36,3
4	1	1	1,6	3,2	6,4	0,7	1,5	2,7	1,4	3,0	5,3	0,7	1,7	3,0
		2	4,8	9,8	17,3	1,7	3,5	6,0	3,9	8,0	14,1	2,1	4,4	7,3
		3	6,0	12,9	21,4	2,6	5,4	9,4	4,9	11,4	19,5	3,1	6,1	11,0
	2	1	0,5	1,0	1,9	0,5	1,1	2,0	0,4	0,8	1,7	0,5	1,0	1,7
		2	1,4	2,9	5,0	2,2	4,3	7,4	1,4	3,1	5,1	1,4	2,9	5,2
		3	2,5	4,8	7,9	3,2	6,1	9,8	2,2	4,7	7,3	2,2	4,5	7,6
	3	1	0,7	1,8	3,6	0,6	1,5	2,9	0,7	1,5	2,9	2,2	4,6	9,1
		2	2,1	4,8	7,9	1,7	3,1	5,6	1,5	3,6	5,9	8,1	16,6	29,7
		3	2,9	5,8	9,9	2,3	4,9	7,6	2,5	5,1	8,6	10,1	20,8	34,3
5	1	0,7	1,7	3,2	0,7	1,5	2,4	2,2	4,8	8,3	0,7	1,6	3,4	
	2	1,8	3,6	6,1	1,5	3,5	5,8	7,0	15,0	23,7	2,3	4,3	7,3	
	3	2,5	5,1	8,7	2,1	4,5	8,1	7,6	18,5	31,4	3,6	7,1	12,2	
6	1	0,5	1,1	1,9	0,6	1,4	2,5	2,2	4,9	9,1	0,4	0,8	1,6	
	2	1,3	2,6	4,4	1,6	3,6	6,1	7,4	15,6	26,7	1,2	2,4	4,0	
	3	1,6	3,5	6,0	2,6	5,0	9,1	8,8	20,4	33,1	1,7	4,0	6,6	
7	1	1	2,0	4,7	9,5	0,5	0,9	1,6	1,1	2,5	4,4	0,6	1,2	2,2
		2	6,1	13,0	21,1	1,2	2,6	5,0	3,5	7,4	12,6	1,7	3,6	6,7
		3	5,8	11,7	20,0	2,4	4,7	7,4	4,9	10,1	17,1	2,9	6,2	9,6
	3	1	1,1	2,4	4,1	0,4	0,9	1,6	0,3	0,6	1,2	0,3	0,7	1,4
		2	2,2	5,0	8,7	1,3	2,7	4,7	1,0	2,0	3,4	0,9	2,0	3,5
		3	2,3	5,6	9,3	1,8	3,6	6,4	1,7	3,1	5,1	1,5	3,2	5,2
8	1	1	1,8	4,2	7,8	0,5	1,2	2,0	1,2	2,4	4,7	0,5	1,0	2,0
		2	3,9	8,4	13,6	1,4	3,1	5,4	3,5	8,4	14,1	1,8	3,8	6,9
		3	4,6	9,3	16,3	2,0	4,5	7,5	5,7	10,5	18,3	2,6	5,4	9,2
	3	1	1,2	2,6	4,6	0,5	1,2	2,1	0,4	0,8	1,4	0,3	0,6	1,1
		2	2,3	5,0	8,9	1,6	3,2	5,4	1,1	2,1	3,8	1,1	2,1	3,5
		3	3,1	6,1	10,2	2,4	4,5	7,7	1,4	3,1	5,2	1,4	3,3	5,1

Окончание таблицы 1
Ending table 1

9	6	1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,3	0,7	1,2
		2	0,6	1,6	2,9	0,7	1,4	2,4	0,5	0,9	1,5	0,7	1,6	2,9
		3	1,1	2,3	3,9	0,9	1,9	3,2	0,7	1,5	2,5	1,3	2,6	4,5
	5	1	0,3	0,7	1,2	0,3	0,6	1,1	0,2	0,4	0,7	0,6	1,8	3,9
		2	1,1	2,2	3,9	0,7	1,4	2,3	0,5	1,1	1,8	3,6	8,3	14,1
		3	1,5	3,1	5,2	1,0	2,1	3,6	0,8	1,8	3,2	5,6	10,3	18,4
10	6	1	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,7	0,1	0,2	0,4	0,3	0,5	1,0
		2	0,7	1,5	2,8	0,7	1,4	2,3	0,4	0,8	1,5	0,6	1,5	2,7
		3	1,1	2,4	3,9	0,9	1,9	3,2	0,7	1,2	2,2	1,2	2,6	4,2
	5	1	0,3	0,7	1,3	0,2	0,5	0,8	0,1	0,3	0,6	0,6	1,5	3,8
		2	1,1	2,3	3,9	0,5	1,1	2,0	0,5	1,0	1,8	3,8	8,8	14,7
		3	1,7	3,3	5,7	0,9	1,8	3,0	0,9	1,7	2,8	4,5	10,0	18,5
11	2	1	0,2	0,5	0,8	0,2	0,3	0,6	0,1	0,3	0,5	0,3	0,6	1,2
		2	0,6	1,4	2,3	0,7	1,3	2,4	0,4	0,8	1,5	0,9	1,7	3,2
		3	1,0	2,1	3,6	0,9	1,7	3,1	0,6	1,2	2,2	1,4	2,7	4,5
	3	1	0,2	0,6	1,2	0,4	0,8	1,4	0,1	0,3	0,6	1,0	2,2	4,4
		2	1,2	2,3	4,1	0,7	1,5	2,5	0,5	1,0	1,7	4,6	9,6	15,5
		3	1,9	3,5	5,6	1,1	2,1	3,4	0,7	1,7	2,9	6,4	12,4	21,2
	1	1	0,7	1,6	3,1	0,3	0,7	1,5	0,4	0,9	1,5	0,6	1,6	2,8
		2	3,8	8,2	14,4	1,1	2,4	4,6	1,2	2,3	4,1	2,3	4,5	7,7
		3	5,1	11,2	18,2	2,2	4,4	7,7	1,9	3,8	6,8	3,4	6,6	11,2
12	2	1	0,2	0,4	0,7	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2	0,4	0,3	0,6	1,1
		2	0,6	1,2	2,1	0,7	1,5	2,5	0,4	0,9	1,6	0,9	1,9	3,1
		3	0,9	1,9	3,3	0,9	2,0	3,7	0,6	1,4	2,4	1,3	2,7	4,7
	3	1	0,2	0,5	0,9	0,2	0,6	1,0	0,1	0,3	0,6	0,8	1,9	3,9
		2	0,8	1,6	2,9	0,7	1,4	2,2	0,5	1,0	1,8	4,8	9,6	17,0
		3	1,2	2,5	4,1	1,0	1,8	3,1	0,9	1,9	3,0	5,3	11,7	19,7
	1	1	0,7	1,6	3,1	0,3	0,7	1,5	0,2	0,6	1,4	0,7	1,4	2,6
		2	3,5	7,1	12,2	1,4	3,0	5,0	1,1	2,5	4,3	2,2	4,2	7,5
		3	4,4	9,5	16,9	2,0	4,6	7,9	1,8	4,0	6,7	2,8	6,3	10,9

Механизмы ДА остаются не до конца изученным феноменом [6, 7], основанным на нейрофизиологических процессах регуляции сложных движений с доминированием инерциальных компонентов [3, 8, 9], при которых растяжимость эластических элементов сочетается с изометрическим напряжением контрактивных в условиях равных энергетических затрат, что формирует различные условия двигательных компенсаций [6, 10]. В то же время ДА верхних и нижних конечностей происходят по разным механизмам [11], что лишний раз подчеркивает необходимость комплексной оценки всех СЭ ЛС в своей совокупности.

В клинической практике зачастую ставится вопрос об эффективности проводимого лечения. Методы КБ являются наиболее целесообразными в количественной оценке нарушений НССДФ, например, при установлении динамики проводимой терапии. В то же время в изученных авторами литературных источниках отсутствуют упоминания о прикладных клинических техниках оценки ДА. Вероятнее всего, данный диссонанс между реальной клинической потребностью в стандартизированном инструменте и предложенных решениях обусловлен сложными процессами рефлекторного регулирования контрактивности саркомеров как основного элемента компенсации излишних мышечных сокращений в ограниченных условиях энергетических затрат [3, 6, 9, 12]. В то же время процесс ДА сопровождается запуском противоположных по своей сути нейрофизиологических механизмов, направленных на повышение жесткости СЭ как за счет стабилизации, так и за счет активации динамической фазы движений [13, 14].

Учитывая данные особенности формирования ДА, авторами была разработана и предложена, в качестве прикладного инструмента, методика оценки инерциальной кинематики, основанная на частотном анализе ускорений СЭ ЛС. По мнению авторов, ее главным преимуществом является принципиальное отличие от постурологических тестов, используемых при стабилотрии. В рамках выполнения всей ДБПТ выявляются специфические элементы ДА, свойственные для определенного пространственного перемещения. Выполнение тестов не требует соблюдения строгих предубеждений позы или выполнения стереотипных и, в том числе, циклических движений, в рамках которых

компенсации двигательного дефекта могут оставаться адаптированными в кинематических пределах общего двигательного пула. Разработанный подход строится на создании провокационных ситуаций, связанных с выполнением целенаправленных действий, при которых в общую двигательную программу встраиваются инерциальные двигательные компоненты как результирующие интегральной работы функции произвольных двигательных реакций и контроля произвольных двигательных функций.

Применение инновационной методики позволило установить, что при выполнении ДБПТ в каждом тестовом задании инерциальная кинематика СЭ1 и СЭ2 была одинаковой ($p=0,0$), что свидетельствует об универсальных механизмах ДА, свойственных для аксиальной мускулатуры. Средние значения ПИК для аксиального отдела ЛС составили: в ЧП1 – 0,3 [0,6/0,1] рад/с², в ЧП2 – 1,1 [2,0/0,5] рад/с², в ЧП3 – 1,8 [3,1/0,9] рад/с². Вместе с тем установлены статистически большие значения ПИК СЭ9 в сравнении с СЭ10 при ВД5 во время выполнения ТЛЛД, что может быть связано с запуском вращательных движений ВКЗ как механизма ДА. При сравнении кинематики СЭ3 и СЭ4 для ТЛПВ выявлены статистически большие значения ПИК во всех ВД, что связано с моторными компенсациями вертикальных перемещений, при которых основная нагрузка, связанная со стабилизацией ЛС, приходится на ВКР, а именно, на тазобедренный сустав. При выполнении ТАРВ картина формирования ДА имеет противоположный характер, когда большие ПИК отмечаются со стороны ведущего тазобедренного сустава, что обуславливается доминирующей кинематикой ВКЗ при выполнении целенаправленных движений. Выполнение ТВДД выявило статистические различия кинематики СЭ3 и СЭ4 в ВД2 (во всех ЧП), что указывает на большую кинематическую активность СЭ3 при отведении и приведении ведущего, а также ротациях бедра (ВД3 ЧП2 и ЧП3). Выполнение перемещений во фронтальной плоскости во время ТЛЛД связано с активацией инерциальной кинематики со стороны СЭ3 во время сгибания и разгибания (ЧП2), а также со стороны СЭ4 при отведении (ЧП2 и ЧП3), что является следствием запуска механизмов активации кинематики в виде флексии ведущего бедра и отведения противоположного СЭ. При сравнении ПИК СЭ5 и СЭ6 установлено, что при ТВДД и ТАРВ происходит активация механизмов ДА со стороны ВКЗ, выполнение других тестов имеет противоположную картину, что связано со спецификой тестовых заданий.

Аналогичная картина отмечается при сравнении СЭ7 и СЭ8. Так, большие ПИК СЭ7 зафиксированы во всех ЧП ВД1 при выполнении ТВДД и ПИК 7.1.1, 7.1.3 и 7.3.1 при выполнении ТАРВ. Со стороны СЭ8 установлены большие значения ПИК во всех ЧП ВД3 ТЛЛД и ВД1 ТЛПВ. Механизмы ДА со стороны СЭ11 и СЭ12 идентичны для всех тестов и связаны с активацией инерциальной кинематики ВКЗ при выполнении сгибаний и осевых ротаций, на что указывают большие значения ПИК ВД3 во всех ЧП, за исключением ЧП2 ТЛЛД, а также ВД1, за исключением ЧП1 ТВДД, ЧП2 и ЧП3 ТЛПВ.

Таким образом, проведенное исследование выявило наличие универсальных механизмов моторной регуляции процессов ДА, связанных с активацией компонентов осевых ротаций туловища и осевых ротаций и сгибаний ведущего плечевого сустава. Вместе с этим обеспечение динамической фазы постуральной регуляции при осевых ротациях и наклонах туловища приводит к активации механизмов ДА со стороны ведущего тазобедренного, коленного и голеностопного суставов, при этом аксиальные перемещения формируют картину кинематической стабилизации данных элементов ЛС.

Заключение

Результатом проведенного исследования явилась разработка методики оценки феномена двигательной адаптации со стороны основных суставных элементов локомоторной системы, принимающих участие в обеспечении эффективного поддержания постурального баланса тела при выполнении инерциальных моторных компонентов сложных целенаправленных действий. Разработанная методика включает: 1) выполнение стандартизированной диагностической батареи постуральных тестов, каждый из которых является специфичным в отношении определенной кинематической плоскости; 2) анализ суставных девиаций с выделением показателей инерциальной кинематики.

Анализ разработанных показателей позволил установить ряд универсальных механизмов двигательной адаптации на уровне туловища, нижних конечностей и плечевых суставов, связанных с активацией осевых ротаций туловища и осевых ротаций и сгибаний ведущего плечевого сустава со стороны ведущего кинематического звена. Двигательная адаптация на уровне нижних конечностей имеет двойственную природу. В первую очередь она связана с активацией динамической фазы постурального регулирования при выполнении осевых ротаций и наклонов. С другой стороны, аксиальные перемещения туловища вдоль вертикали формируют кинематическую стабилизацию в суставах ведущего кинематического звена.

Полученные данные могут использоваться в клинической практике как показатели «нормы» при оценке нарушений нейромышечных скелетных и связанных с движением функций и требуют проведения дополнительных исследований в данном направлении.

References

1. Lieber R.L., Fridén J. Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve*. 2000;23(11):1647-66. DOI: 10.1002/1097-4598(200011)23:11<1647::aid-mus1>3.0.co;2-m.
2. Loudon J.K. Biomechanics and pathomechanics of the patellofemoral joint. *Int J Sports Phys Ther*. 2016;11:820-830. PMC5095937.
3. Almarwani M., Van Swearingen J.M., Perera S., Sparto P.J., Brach J.S. Challenging the motor control of walking: Gait variability during slower and faster pace walking conditions in younger and older adults. *Arch. Gerontol. Geriatr*. 2016;66:54-61.
4. Sawicki G.S., Sheppard P., Roberts T.J. Power amplification in an isolated muscle-tendon unit is load dependent. *J Exp Biol*. 2015;218(22):3700-3709. DOI: 10.1242/jeb.126235.
5. Ozinga S.J., Machado A.G., Koop M.M., Rosenfeldt A.B., Alberts J.L. Objective Assessment of Postural Stability in Parkinson's Disease Using Mobile Technology Mobile Technology for Assessment of PD Postural Stability. *Mov. Disord*. 2015;30:1214-1221.
6. Lieber R.L., Fridén J. Spasticity causes a fundamental rearrangement of muscle-joint interaction. *Muscle Nerve*. 2002;25(2):265-270. DOI: 10.1002/mus.10036.
7. Boakes J.L., Foran J., Ward S.R., Lieber R.L. Muscle adaptation by serial sarcomere addition 1 year after femoral lengthening. *Clin Orthop Relat Res*. 2007;456:250-263.
8. Arnold E.M., Ward S.R., Lieber R.L., Delp S.L. A model of the lower limb for analysis of human movement. *Ann Biomed Eng*. 2010;38(2):269-279. DOI: 10.1007/s10439-009-9852-5.
9. Takakusaki K., Tomita N., Yano M. Substrates for normal gait and pathophysiology of gait disturbances with respect to the basal ganglia dysfunction. *J Neurol*. 2008;255(4):19-29. DOI: 10.1007/s00415-008-4004-4007.
10. Holt N.C., Roberts T.J., Askew G.N. The energetic benefits of tendon springs in running: is the reduction of muscle work important? *J Exp Biol*. 2014;217(24):4365-4371. DOI: 10.1242/jeb.112813.
11. Lieber R.L., Roberts T.J., Blemker S.S., Lee S.S.M., Herzog W. Skeletal muscle mechanics, energetics and plasticity. *J Neuroeng Rehabil*. 2017;14:108. DOI: 10.1186/s12984-017-0318-y PMID: 29058612.
12. Roberts T.J., Konow N. How tendons buffer energy dissipation by muscle. *Exerc Sport Sci Rev*. 2013;41(4):186-193. DOI: 10.1097/JES.0b013e3182a4e6d5.
13. Fukunaga T., Kubo K., Kawakami Y., Fukashiro S., Kanehisa H., Maganaris C.N. In vivo behaviour of human muscle tendon during walking. *Proc Biol Sci*. 2001;268(1464):229-233. DOI: 10.1098/rspb.2000.1361.
14. Gao F., Grant T.H., Roth E.J., Zhang L.Q. Changes in passive mechanical properties of the gastrocnemius muscle at the muscle fascicle and joint levels in stroke survivors. *Arch Phys Med Rehabil*. 2009; 90(5):819-826. DOI: 10.1016/j.apmr.2008.11.004.

Вклад авторов

Лукашевич В.А. разработал концепцию исследования, провела статистическую обработку данных, выполнила анализ данных и описание выявленных тенденций, подготовила черновик рукописи.

Пономарев В.В. сформировал задачи исследования, выводы, подготовил окончательный вариант рукописи.

Мицкевич В.Е. выполнил описание методологии исследования, сбор данных, расчет показателей.

Губкин С.В. разработал теорию исследования, выполнил анализ полученных параметров.

Гаврилович Ю.А., Журко Е.А., Кипель А.Н. в равной степени приняли участие в разработке математической модели на основе программного продукта «Open Sim», интеграции кватернионов в виртуальную скелетную модель тела человека.

Authors' contribution

Lukashevich U.A. developed the research concept, performed statistical data processing, data analysis and description of identified trends, and prepared the draft manuscript.

Ponomarev U.U. formulated the research objectives and findings, and drafted the final manuscript.

Mitskevich U.E. described the research methodology, collected data and calculated the indicators.

Gubkin S.V. was responsible for the research theory and the analysis of the obtained parameters.

Gavrilovich Y.A., Zhurko E.A., Kipel A.N. developed a mathematical model based on the “Open Sim” software product, and implemented integration of quaternions into a virtual skeletal model of the human body.

Сведения об авторах

Лукашевич В.А., к.м.н., докторант БелМАПО.

Пономарев В.В., д.м.н., профессор, заведующий кафедрой неврологии и нейрохирургии БелМАПО.

Мицкевич В.Е., биомедицинский инженер УП «ВРТЭК».

Губкин С.В., д.м.н., профессор, директор института физиологии НАН Беларуси.

Гаврилович Ю.А., бакалавр, инженер-программист УП «ВРТЭК».

Журко Е.А., бакалавр, инженер-программист УП «ВРТЭК».

Кипель А.Н., бакалавр, математик УП «ВРТЭК».

Information about the authors

Lukashevich U.A., PhD, Doctoral candidate BelMAPGE.

Ponomarev U.U., D.Sci, Professor, Head of the Department of Neurology and Neurosurgery BelMAPGE.

Mitskevich U.E., Biomedical Engineer UE “VRTEK”.

Gubkin S.V., D.Sci., Professor, Director of the Institute of Physiology of the NAS of Belarus.

Gavrilovich Y.A., Bachelor, Software Engineer UE “VRTEK”.

Zhurko E.A., Bachelor, Software Engineer UE “VRTEK”.

Kipel A.N., Bachelor, Mathematician UE “VRTEK”.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 3, к. 3,
Белорусская медицинская академия
последипломного образования
тел. +375-44-566-11-22;
e-mail: u.lukashevich@gmail.com
Лукашевич Владислав Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka Str., 3, building 3,
Belarusian Medical Academy
of Post Graduate Education
tel. +375-44-566-11-22;
e-mail: u.lukashevich@gmail.com
Lukashevich Uladzislau Anatolyevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-71-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 681.2

НАБЛЮДАТЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛЕСАХ КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИХ ГРАФАХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

ХАДЖИНОВА Н.В., РЕВОТЮК М.П., ШИЛИН Л.Ю.

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

Поступила в редакцию 29 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы – разработка базовых структур данных и эффективных по быстродействию и памяти алгоритмов слежения за изменениями предопределенных решений о множествах кратчайших путей на транспортных сетях, уведомления о которых получают автономные координируемые транспортные агенты с централизованным или коллективным управлением. Характерная особенность транспортных операций – независимость и асинхронность появления возмущений оптимальных решений, а также отсутствие глобального влияния отдельных возмущений на множество всех процессов на сети. Тем самым, очевидно, определяется целесообразность реализации идеи реоптимизации существующих решений в реальном времени по мере поступления информации о возмущениях структуры и параметров транспортной сети, различных ограничений на использование существующих кратчайших путей. В отличие от классических задач поиска кратчайших путей на статических или динамических графах, набор контролируемых наблюдателем ситуаций предлагается дополнить учетом ассоциаций деревьев кратчайших путей с фактически использующими такие пути агентами. Это позволит улучшить реактивность процессов уведомления агентов для своевременного переключения на новый путь. Пространство состояний поиска – динамически формируемый двудольный разреженный граф транспортной сети, представленный списком дуг. Базовый алгоритм поиска кратчайших путей использует схему Дейкстры, но реализует для формирования результата поиска метод бутстрэппинга. Компактность представления наблюдаемого леса кратчайших путей достигается отображением отдельных деревьев такого леса на проекцию вершин дерева в памяти, где позиция каждой вершины соответствует расстоянию от корня дерева. Предложенная версия построения процедуры поиска опирается на существующие в системах управления базами данных механизмы создания разных реляционных представлений физической модели данных. Это избавляет от необходимости решения технологических задач комплексирования гетерогенных моделей динамических транспортных сетей, распределения памяти. В результате спецификация различных правил логистики транспортных операций упрощается, так как такие операции в терминах объектно-ориентированных моделей легко определяются полиморфными классами переходов между узлами транспортной сети.

Ключевые слова: транспортная сеть, кратчайший путь, метод реоптимизации, мониторинг изменений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Хаджинова Н.В., Ревотюк М.П., Шилин Л.Ю. Наблюдатель изменений в лесах кратчайших путей на динамических графах транспортных сетей. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 71-79.

OBSERVER OF CHANGES IN THE FOREST OF THE SHORTEST PATHS ON DYNAMIC GRAPHS OF TRANSPORT NETWORKS

NATALIA V. KHAJYNOVA, MIKHAIL P. REVOTJUK, LEONID Y. SHILIN

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

Submitted 29 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work is the development of basic data structures, speed-efficient and memory-efficient algorithms for tracking changes in predefined decisions about sets of shortest paths on transport networks, notifications about which are received by autonomous coordinated transport agents with centralized or collective control. A characteristic feature of transport operations is the independence and asynchrony of the emergence of perturbations of optimal solutions, as well as the lack of global influence of individual perturbations on the set of all processes on the network. This clearly determines the feasibility of realizing the idea of reoptimizing existing solutions in real time as information is received about disturbances in the structure and parameters of the transport network, various restrictions on the use of existing shortest paths. In contrast to the classical problems of finding shortest paths on static or dynamic graphs, it is proposed to supplement the set of situations controlled by the observer by taking into account the associations of shortest path trees with agents that actually use such paths. This will improve the responsiveness of agent notification processes for timely switching to a new path. The space of search states is a dynamically generated bipartite sparse graph of the transport network, represented by a list of arcs. The basic algorithm for finding the shortest paths uses Dijkstra's scheme, but implements a bootstrapping method to generate the search result. The compactness of the representation of the observed forest of shortest paths is achieved by mapping individual trees of such a forest onto the projection of tree vertices in memory, where the position of each vertex corresponds to the distance from the tree root. The proposed version of the construction of the search procedure is based on the mechanisms existing in database management systems for creating different relational representations of the physical data model. This eliminates the need to solve technological problems of complexing heterogeneous models of dynamic transport networks, memory allocation. As a result, the specification of various rules for the logistics of transport operations is simplified, since such operations in terms of object-oriented models are easily determined by polymorphic classes of transitions between nodes of the transport network.

Keywords: transport network, shortest path, reoptimization method, monitoring of changes.

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

For citation. Khajynova N.V., Revotjuk M.P., Shilin L.Y. Observer of changes in the forest of the shortest paths on dynamic graphs of transport networks. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 71-79.

Введение

Объект исследования – процессы управления системами взаимодействующих агентов, определяемые на динамических графах транспортных сетей в терминах задач поиска кратчайших путей. Подвижные агенты, автономно реализуя отдельные транспортные операции, при планировании своей деятельности нуждаются в актуальной информации об обстановке на транспортной сети. Такая информация может дополнять статические описания сетей в виде карт, дорожных знаков оперативными данными о различных ограничениях, природных или техногенных авариях, пробках. Оперативная информация из разных источников в полном объеме чаще всего может учитываться только централизованно (например, [1–3]), а специально создаваемый наблюдатель должен по мере ее поступления высылать уведомления зарегистрированным агентам о интересующих их изменениях. Интересы агента здесь и далее предполагаются отраженными на понятие кратчайшего пути на графе транспортной сети, узлы которой соответствуют фазам транспортного процесса. Способ отображения должен быть известным наблюдателю, а различные параметры модели

транспортных операций, а также ограничения, включая временные, должны проецироваться вычисляемыми функциями на дуги нагруженного ориентированного графа.

Пусть транспортная сеть задана нагруженным ориентированным графом $G(V, E)$, где V – множество вершин, E – множество дуг с весовой функцией $W: E \rightarrow R^+$. Процесс построения дерева кратчайших путей лучшим для этого алгоритмом Дейкстры [4] реализует рекурсивный однократный просмотр дуг до исчерпания возможности его развития из исходной вершины и характеризуется вычислительной сложностью $O(m + n \cdot \log_2 n)$, где $m = |E|$, $n = |V|$.

Очевидно, что реализация алгоритма Дейкстры на графах с изменяемой структурой порождает проблему выбора способа представления графа и пространства состояний процесса поиска решения. Нагруженный граф $G(V, E)$, представляющий реальную транспортную сеть, обычно имеет незначительную степень связности вершин, поэтому практически задается списком дуг и полностью определяется тернарным отношением $G(x, y, w)$, где x, y – концевые вершины дуги с весом w . В таких случаях описание графа задано легко модифицируемым списком дуг с расширяемыми множествами V и E .

Задачи поиска кратчайших путей для координируемых операций на транспортных сетях объективно локальны. Такие задачи можно представить отношением $F(a, o, d)$, где a – агент, нуждающийся в описании кратчайшего пути из вершины o в вершину d графа сети, $o, d \in V$. В любой момент времени существует потребность в наличии информации о кратчайших путях из множества $X = \{x | (? , x, ?) \in F\}$ до множества $Y = \{y | (? , ?, y) \in F\}$. На практике для отдельной транспортной системы всегда справедливо $|X| \ll |V|$ и $|Y| \ll |V|$, а информация о кратчайших путях актуальна лишь для множества агентов $Z = \{z | (z, ?, ?) \in F\}$.

В установленном состоянии сети такая информация может выбираться из множества леса деревьев кратчайших путей, сохраняемых в таблице отношения $T^s(s, x, d, p)$, где s – корневой узел дерева, $s \in \overline{X}$; x – произвольный узел дерева, $x \in V$; d – расстояние от корня s до узла x , p – номер предшествующего узла кратчайшего пути в узел x . Здесь \overline{X} – потенциально интересный для конкретной транспортной системы набор корневых вершин дерева из леса, $\overline{X} \subseteq V$. Кроме этого, полезно определить ограничение глубины деревьев кратчайших путей множеством конечных вершин \overline{F} , когда всегда справедливо $Y \subseteq \overline{F}$.

Информация о возмущениях транспортной сети может быть задана списком дуг с изменившимися весами, представленным отношением $R(x, y, w)$, где x, y – концевые вершины дуги с весом w (значение $w = \infty$ означает запрос удаления дуги $x \rightarrow y$). При этом не обязательно выполнение условия $x, y \in V$, что означает отсутствие запрета на коррекцию любой части графа транспортной сети. Если в этот момент выполняется условие $(x \in X) \vee (y \in Y)$, то множество агентов $J = \{a | (a, o, d) \in T(o, d, ?, ?)\}$ должно получить информацию о новом пути после его реоптимизации.

Таким образом, фазы перехода между устанавливающимися состояниями процесса слежения за оптимальностью построенных на сети путей включают выявление факта $R \neq \emptyset$, этап реоптимизации и перестройки $T^s(s, x, d, p)$ для изменившегося отношения $G(x, y, w)$, выявление множества заинтересованных в актуальности информации агентов J и передачу им описания изменения оптимального пути. Далее, в контекстах обсуждения отдельного дерева в лесу, верхний индекс s , помечающий корень дерева, будем опускать.

Предмет обсуждения – модели и алгоритмы контроля состояния транспортной сети с уведомлением о результатах решения задачи реоптимизации дерева путей. В отличие от известных постановок задач реоптимизации дерева путей [4–7], здесь будут учитываться интересы потребителей результатов решения отдельных локальных задач в лесу подграфов исходного графа. Для этого, кроме сокращения времени на перестройку отдельного дерева путей, необходимо обеспечить формирование актуальных для планирования и реализации конкретных транспортных операций уведомлений об изменении кратчайших путей.

Методика решения задачи

Модель графа и пространства состояния поиска. Предлагаемая далее схема поиска дерева кратчайших путей основана на аналогии последовательного складывания ветвей дерева от корня до последнего постоянно включаемого (помеченного) в дерево узла методом бутстрэппинга. Такой метод отличается возможностью реализации на чисто реляционных моделях, что обеспечивает открытость их расширения для учета различных ограничений.

Рассмотрим вначале форму задания графа транспортной сети, а затем модель переменных состояния поиска кратчайших путей. Здесь будут использованы понятия отношения и представлений (view) таблиц в терминах реляционных баз данных.

Пространство состояний поиска решения в традиционных реализациях алгоритма Дейкстры является проекцией множества вершин графа всей транспортной сети на D – массив расстояний вершин от корня дерева, P – массив номеров предшествующих вершин пути, Q – приоритетная очередь вершин, где элементы упорядочены по текущему значению расстояния от корня дерева [4, 5]. При этом $|D|=|V|$, $|P|=|V|$, $|Q|\leq|V|$.

Метод бутстрэппинга принципиально работает с подграфом исходного графа, что вполне соответствует ограниченности размера искомого дерева. В случае поиска кратчайших путей на множестве вершин некоторой компактной части графа, несложно увидеть возможность модификации алгоритма Дейкстры, когда поиск проводится на расширяемом подграфе с последовательно включаемыми вершинами создаваемого дерева кратчайших путей от заданной корневой вершины.

Алгоритм Дейкстры для каждой вершины x требует представления множества непосредственно достижимых смежных вершин $x', x'=\{k \mid w(x,k) > 0\}$, где $w(x,k)$ – вес дуги $x \rightarrow k$, $x, k \in V$. На основе таблицы отношения $G(x, y, w)$ для графа G легко построить его виртуальное представление $G_x(x, y, w)$ в форме FSF (Forward Star Form). Индексация кортежей такой таблицы по ключу x формально определяет множество связей $\{(x, y, w), y \in x'\}$, $x \in V$. После этого проверка условия $x \in V$ состоит в оценке успеха поиска кортежа с ключом x в таблице G_x .

Обозначим для каждой вершины y множество входных смежных вершин $'y$, $'y=\{k \mid w(k,y) > 0\}$, где $k, y \in N$. Виртуальное представление $G_y(x, y, w)$ в форме BSF (Backward Star Form) инверсии графа образуется после индексации таблицы отношения $G(x, y, w)$ по ключу y . Такое представление определяет множество кортежей $\{(x, y, w), x \in 'y\}$, $y \in V$. Успех поиска кортежа с ключом y в таблице G_y означает истинность условия $y \in V$.

Таким образом, имеем $V = V_x \cup V_y$, что означает отсутствие необходимости явного отдельного определения множества V . Операция расширения двудольного графа $G(V, E)$ реализуется на логическом уровне модели данных без использования понятия адресной функции. Это влечет отсутствие проблем комплексирования существующих моделей транспортной сети из разных источников и разной степени детализации. Кроме этого, доступно описание ограничений на условия перемещения на сети в терминах функций как отношений.

Так как любое дерево – связный граф, то если s – корневая вершина, а x – некоторый узел или лист дерева кратчайших путей, $s, x \in V$, то кратчайший путь $s \rightarrow x$ можно восстановить обратным движением из листа x :

$$p(s, x) = \{x, P(x), P(P(x)), \dots, s\}. \quad (1)$$

По определению элементы множества $p(s, x)$ в (1) упорядочены по неубыванию значений расстояния от корня s . Альтернативы расширения дерева кратчайших путей представлены листьями без постоянной пометки, путь от корня до которых необязательно кратчайший.

Пусть L_k – множество листьев существующего на этапе k дерева кратчайших путей, а L_k^* – подмножество листьев без постоянной пометки. Согласно (1), на любом этапе

$$L_k = \bigcup \{p(s, x), x \in L_k\}. \quad (2)$$

Рост дерева кратчайших путей происходит только из ближайшего к корню листа x_k без пометки, $x_k = \arg \min_x \{d(x), x \in L_k^*\}$. Лист x_k превращается в узел ветвления после операции $L_{k+1}^* = L_k^* \setminus \{x_k\}$ и до окончания поиска становится пассивным (получает постоянную метку). Ветвление из узла x_k может привести к включению новых или коррекции в сторону уменьшения расстояния от корня s дерева существующих в L_{k+1}^* листьев из множества x_k' . Так как каждому элементу $x, x \in L_k$, соответствует $d(x)$ – длина пути до корня s , то элементы множества $L_k^* = \{x \mid d(x) \geq d(x_k), x \in L_k\}$ представляют приоритетную очередь [4, 5].

Очевидно, элементы $x \in L_k \setminus L_k^*$ остаются упорядоченными по невозрастанию значений $d(x)$. Таким образом, необходимо отображение ассоциаций $x \rightarrow p(x)$, $x \rightarrow d(x)$ и $d(x) \rightarrow x$ среди переменных состояния процесса построения дерева. Для этого определим отношение $T(x, d, p)$, где x – номер узла дерева, d – расстояние от корня до узла x , p – номер предшествующего узла не обязательно кратчайшего пути в узел x .

Состояние процесса построения дерева на любом его этапе k представлено тройками $(x, d(x), p(x)), x \in L_k^*$. Начальное состояние процесса построения дерева соответствует тройке $(s, 0, s)$. Условие завершения процесса – $(L_k^* = \emptyset)$ или $(x_k = t)$, если t – конечная вершина пути. В любом случае $k \leq |V|$ после завершения поиска пути $s \rightarrow t$.

Важно отметить, что кортежи $T(x, d, p)$ задают динамически порождаемые графы дерева кратчайших путей (проекция $T(x, d, p) \rightarrow T_p(x, p)$) и дерева расстояний (проекция $T(x, d, p) \rightarrow T_d(x, d)$). Учитывая, по определению L_k^* , уникальность атрибута x в исходном отношении $T(x, d, p)$ и его упомянутых проекциях, $T(x, d, p) \equiv T_d(x, d) \oplus T(x, p)$, где символ \oplus обозначает операцию соединения отношений по атрибуту x . Отсюда следует, что для отображения результата построения дерева кратчайших путей достаточно использовать рутинный в современных технологиях баз данных механизм виртуальных представлений отношения $T(x, d, p)$.

Различные виртуальные представления отношения $T(x, d, p)$ отличаются выражениями ключей упорядочения кортежей. В качестве таких ключей могут быть x , d и конкатенация атрибутов $p+x$. В результате дерево кратчайших путей в табличной форме задается вариантами представлений:

T_0 – размещение кортежей в памяти на физическом уровне;

T_x – справочник номеров (идентификаторов) начальных вершин дуг графа;

T_d – таблица значений расстояния до вершин графа от его корневой вершины;

T_p – справочник номеров начальных и конечных вершин дуг графа (инверсия графа дерева кратчайших путей, требующаяся для реализации алгоритмов реоптимизации).

Виртуальное представление отношения может определяться разными способами, конкретизируемыми в среде программирования баз данных. Например, поддержка понятия структурных индексов обеспечивает возможность отображения нескольких законов упорядочения одной таблицы отношения. Кортежи такой таблицы наряду с явно идентифицируемыми полями имеют два часто полезных дополнительных атрибута:

k^0 – номер кортежа в таблице на физическом уровне;

k^o – номер кортежа в порядке последовательного перечисления кортежей в соответствии с заданным ключом o законом упорядочения (обычно явно не задается,

но в процессе перемещения любым способом по кортежам корректность номера текущего кортежа выявляется функциями обнаружения выхода за пределы допустимых номеров строк существующей таблицы).

Навигация по кортежам любого представления реализуется операторами поиска по ключу (либо части составного ключа), переходу на начало или конец таблицы, сканированию кортежей по заданным логическим условиям. В любой момент времени некоторый кортеж таблицы представляет текущую позицию с определенным значением k^0 . Изменение значения любого ключа упорядочения меняет соответствие $k^0 \leftarrow k^0$ без изменения k^0 и выражения (2).

Поддержка понятия структурных индексов позволяет представить алгоритмы слежения за изменениями состояния сети средствами программирования реляционных баз данных.

Алгоритм мониторинга изменений дерева путей. Формирование в лесах подграфов графа транспортной сети дерева кратчайших путей с корнем в вершине s проводится по ранее рассмотренной схеме Дейкстры в представлении T_d . Начальное состояние нового поиска – $T_0(x, d, p) = \{(s, 0, s)\}$. Далее, в представлении T_x организуется сканирование определяемой остающимися кортежами приоритетной очереди с целью построения дерева кратчайших путей. Процесс сканирования прерывается после достижения всех целевых вершин, перечисленных во множестве $Y = \{y \mid (?, ?, y) \in F\}$. При этом целевые вершины могут встречаться на кратчайшем пути несколько раз и в любой момент времени исключаться из Y . Контроль необходимости продолжения поиска целевых вершин проводится после выделения при наличии из представления T_x (постоянной пометки) очередной вершины x .

После выборки очередной вершины из очереди в таблице отношения T_d фиксируется позиция кортежа $(x, d_x, ?)$ и в контексте отношения T_x проводится попытка расширения дерева в смежные вершины из множества $\{x'\}$. Если для некоторых вершин справедливо $(y \in x') \wedge (y \notin T_x(x, ?, ?))$, то в T_x добавляется новый кортеж $(y, d_x + c_{xy}, x)$. Для вершин, включенных в T_x ранее, когда справедливо $(y \in x') \wedge (y \in T_x(x, ?, ?))$, выполняется попытка пересмотра кратчайшего пути: если $d_x + c_{xy} < d_y$, то выполняется $(y, ?, ?) \leftarrow (y, d_x + c_{xy})$.

Изменения дуг сети, определяемые отношением $R(x, y, w)$, должны быть учтены в новой версии графа $G_x(x, y, w)$. Пересмотр результата поиска кратчайшего дерева предлагается проводить посредством перестройки дерева, определяя начальное состояние по минимальному расстоянию от корня дерева до безусловно изменяемого поддерева с корнем $x_r = \arg \min_k \{d_k \mid (k \in T_x) \wedge (k, ?, ?) \in R\}$. Это означает возврат в состояние выборки вершины x_r из очереди и продолжение процесса ветвления по схеме Дейкстры для изменяемой части исходного дерева. Очевидно, что при равномерном распределении x_r количество шагов (вычислительная сложность) процесса ветвления сокращается в среднем в два раза.

Процедура перестройки дерева характеризуется надежностью учета любых расширений условий ветвления и ограничений на структуру кратчайших путей. Тем не менее, при малых объемах изменений графа, последняя процедура может быть заменена одной из известных процедур реоптимизации [4, 6, 7] текущего дерева кратчайших путей по представлениям T_x и T_p (в случае выполнения условий их корректного применения).

Особый вид запрашиваемых изменений существующего дерева – расширение списка конечных вершины. В этом случае необходимо продолжить процесс бутстрэппинга, восстановив состояние прерывания поиска в момент достижения наиболее удаленной от корня конечной вершины из T_x . Отсюда следует, что кажущееся полезным удаление из T_x дуг дерева кратчайших путей к листьям вне списка конечных вершин невозможно.

Итак, регулярная обработка фактов изменения дуг графа сети рассмотренными выше процедурами приводит к уведомлению зарегистрированных агентов об изменении структуры интересных им кратчайших путей. Причина появления изменений определяется вне графа, но ее сигнатура может быть включена в параметры дуг графа. Интерпретация таких сигнатур здесь рассматривается как требующая конкретизации рутинная процедура.

Встречный поиск методом бутстрэппинга. Известно, что в случае задач поиска кратчайшего пути между двумя вершинами целесообразно организовать встречный поиск на исходном графе и графе с инвертированными связями вершин. В результате вычислительная сложность поиска сокращается в два раза [4, 8, 9]. Рассмотрим далее способ реализации встречного поиска на реляционных представлениях модели сети и результата поиска.

Пометим элементы обозначения исходного графа символом '+', а инвертированного графа – символом '*'. Можно заметить, что требующиеся графы могут быть легко заданы виртуальными представлениями списка дуг исходного графа $G(x, y, w)$, создаваемыми необходимыми для бутстрэппинга структурами смежности FSF ($G^+ \equiv G_x$) и BSF ($G^* \equiv G_y$).

Пусть на исходном графе G^+ указаны начальная и конечная вершины искомого кратчайшего пути $s \rightarrow t$. Так как $V^+ \cap V^* = \emptyset$, то встречный поиск можно вести порождением двух независимых волн поиска от корней деревьев на несвязном графе $G^+ \cup G^*$. Для этого достаточно одновременно начать процессы ветвления из вершин $s^+ \in V^+$ и $t^* \in V^*$. Последнее соответствует формальному объединению графов фиктивной дугой $s^+ \rightarrow t^*$, для которой $w(s^+, t^*) = \infty$. Таким образом, расширенный граф $G^+ \cup G^*$ оказывается проекцией двух виртуальных графов на список дуг $G(x, y, w)$. Последнее упрощает организацию поиска на динамических графах.

С целью различения процессов на G^+ и G^* , результат поиска кратчайшего пути от вершины s к вершине t при встречном поиске будет представлен деревьями, где узлы идентифицируются конкатенацией номеров вершин исходного графа и признаками принадлежности к виртуальным графам G^+ или G^* : $x^s = x+'+', x \in V^s$; $x^t = x+'*', x \in V^t$. Здесь множества вершин $V^s \subseteq V^+$ и $V^t \subseteq V^*$ встречных деревьев формируются рекурсивным переносом на очередном шаге ветвления буквенными символами признаков принадлежности определенному дереву (направления поиска) от корней из начального состояния: $s^s = s+'+', t^t = t+'*'$. Для этого представим переменные состояния процесса построения дерева кортежами расширенного отношения $T(x, d, p) \rightarrow T(x, d, p, q, z)$, где q – признак направления поиска ($q \in \{+', '*'\}$); z – признак постоянной пометки узла дерева ($z \in \{0, 1\}$).

Состояние процесса построения деревьев встречного поиска на любом его этапе k должно быть представлено пятерками $(x, d(x), p(x), q(x), ?), x \in L_k^*$. Начальное состояние процесса построения деревьев соответствует пятеркам $(s, 0, s, '+', 0)$ и $(t, 0, t, '*', 0)$. Условие завершения процесса – ($L_k^* = \emptyset$). При попытке постоянной пометки вершины x некоторого дерева, когда сопряженная вершина уже является постоянно помеченной [8], процесс приостанавливается¹. После этого необходимо завершить порождение одного из деревьев до встречи с оставшимися помеченными вершинами сопряженного дерева с целью окончательного выделения вершины сопряжения кратчайших путей на встречно растущих деревьях [4, 9]. Далее, следует вернуться по обратному пути до конечной вершины в исходном графе, используя (1).

Изменения дуг сети, принадлежащих графам G^+ и G^* , целесообразно учитывать ранее рассмотренной операцией перестройки дерева с заданным корнем, определяя начальное состояние по минимальному расстоянию от корня дерева s до безусловно изменяемого поддерева с корнем x_r на графе G^+ . В этом случае количество шагов встречного поиска сокращается пропорционально расстоянию от вершины x_r до корня s .

¹ Ревотюк М.П., Хаджинова Н.В. Встречный поиск кратчайших путей на больших динамических графах методом бутстрэппинга. BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. (Республика Беларусь, Минск, 20–21 мая 2020 г.). Минск: Бестпринт, 2020;(1):324-331. Revotjuk M.P., Khajynova N.V. Point-to-point searching of the shortest paths on the big dynamic graphs by the bootstrapping method. Proc. of VI Int. Conf. "BIG DATA and Advanced Analytics" (Republic Belarus, Minsk, 2020 May 20-21). Minsk: Bestprint, 2020;(1):324-331. (In Russ.)

Результаты и их обсуждение

Представления модели поиска решения и результатов оптимизации опираются на современные технологические средства реляционных баз данных, обеспечивая открытость, мобильность и гибкость реализации. Делегирование операций манипулирования пространством состояний поиска и его элементами системам управления базами данных не привело к повышению порядка вычислительной сложности. Время реакции на возмущения графа сети сокращено в среднем в два раза. Объем данных уведомлений об изменении дерева кратчайших путей пропорционален количеству его обновленных дуг.

Список дуг графа транспортной сети может быть задан вариантами представлений таблицы $G(x, y, w) - G_0$, структур смежности прямого и инвертированного графов – G_x и G_y . Потребность в памяти для представлений графа транспортной сети – $O(m+n)$, где $m=|V|$, $n=|E|$. Результат поиска кратчайших путей задается вариантами представлений отношения таблицы $T(x, d, p, q, z) - T_0$, структур смежности прямого и инвертированного дерева кратчайших путей – T_x и T_p , списком элементов приоритетной очереди T_d . Потребность в памяти для представления результата – $O(n)$.

Использование реляционной модели графа позволяет обеспечить независимость ее представлений от схемы идентификации вершин. Нет ограничений на отражение различных эвристик повышения эффективности реализации идей алгоритма Дейкстры, не касающихся понятий адресной функции (например, многоуровневый или направленный поиск).

Заключение

Представленные результаты позволят в рамках современных технологий баз данных обеспечить наблюдение за изменением результатов оптимизации путей на динамических графах неоднородных транспортных сетей с минимальными задержками на обработку особых событий. Вычислительная сложность поиска оптимального решения снижается пропорционально объему локальных изменений данных задачи. Дополнительная память для хранения индексов таблиц виртуальных представлений линейно зависит от размерности модели сети. При этом сокращается потребность в информационном взаимодействии между потребителями результатов оптимизации путей.

Список литературы

1. Sun Y., Yu X., Bie R., Song H. Discovering time-dependent shortest path on traffic graph for drivers towards green driving. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;83:204-212.
2. Рубанов И.В., Баркетов М.С., Ковалев М.Я. Моделирование движения объектов без остановок по сети пересекающихся маршрутов. *Информатика*. 2018;15(1):21-33.
3. Рыбак В.А., Рябычина О.П. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха. *Доклады БГУИР*. 2020;18(4):36-43.
4. Ferone D., Festa P., Napoletano A., Pastore T. Shortest paths on dynamic graphs: a survey. *Pesquisa Operacional*. 2017;37(3):487-508.
5. Pugliese L.D.P., Guerriero F. A survey of resource constrained shortest path problems: Exact solution approaches. *Networks*. 2013;62(3):183-200.
6. Pallottino M.S., Scutelli M.G. A new algorithm for reoptimizing shortest paths when the arc costs change. *Operations Research Letters*. 2003;31(2):149-160.
7. Hooks E., Yang B. Updating paths in time-varying networks given arc weight changes. *Transportation Science*. 2005;39(4):451-464.
8. Nicholson T.A.J. Finding the Shortest Route between Two Points in a Network. *The Computer Journal*. 1966;9(3):275-280.
9. Ревотюк М.П., Кароли М.К., Хаджинова Н.В. Быстрый поиск кратчайших путей на графах с предопределенными решениями. *Доклады БГУИР*. 2014;4(82):73-79.

References

1. Sun Y., Yu X., Bie R., Song H. Discovering time-dependent shortest path on traffic graph for drivers towards green driving. *Journal of Network and Computer Applications*. 2017;83:204-212.
2. Rubanov I.V., Barketau M.S., Kovalyov M.Y. [Modeling movement of objects without stops in a network of crossing routes]. *Informatika = Informatics*. 2018;15(1):21-33. (In Russ.)
3. Rybak V.A., Ryabichina O.P. [Ecological monitoring system of the atmosphere]. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 2020;18(4):36-43. (In Russ.)
4. Ferone D., Festa P., Napoletano A., Pastore T. Shortest paths on dynamic graphs: a survey. *Pesquisa Operacional*. 2017;37(3):487-508.
5. Pugliese L.D.P., Guerriero F. A survey of resource constrained shortest path problems: Exact solution approaches. *Networks*. 2013;62(3):183-200.
6. Pallottino M.S., Scutelli M.G. A new algorithm for reoptimizing shortest paths when the arc costs change. *Operations Research Letters*. 2003;31(2):149-160.
7. Hooks E., Yang B. Updating paths in time-varying networks given arc weight changes. *Transportation Science*. 2005;39(4):451-464.
8. Nicholson T.A.J. Finding the Shortest Route between Two Points in a Network. *The Computer Journal*. 1966;9(3):275-280.
9. Revotjuk M.P., Qaraleh M.K., Khajynova N.V. [Quick search of the shortest paths on the graph with a predetermined decision]. *Doklady BGUIR = Doklady BSUIR*. 2014;4(82):73-79. (In Russ.)

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Хаджинова Н.В., старший преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ревотюк М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шилин Л.Ю., д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий и управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Khajynova N.V., Senior Lecturer of Information Technologies in Automated Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Revotjuk M.P., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Technologies in Automated Systems Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shilin L.Y., D.Sci., Professor, Dean of Faculty of Information Technologies and Control of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Ревотюк Михаил Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Revotjuk Mikhail Pavlovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-80-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.33–027.45

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИМИТАЦИОННОГО ФАКТОРА

БОРОВИКОВ С.М., ШНЕЙДЕРОВ Е.Н., БЕРЕСНЕВИЧ А.И., КАЗЮЧИЦ В.О.

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

Поступила в редакцию 6 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Индивидуальное прогнозирование надежности полупроводниковых приборов с учетом постепенных отказов является актуальной задачей, так как позволяет выбрать высоконадежные экземпляры для ответственных электронных устройств длительного функционирования. Применительно к биполярным транзисторам предлагается подход, позволяющий решать задачу прогнозирования путем использования в качестве имитационного воздействия электрическое напряжение, прикладываемое к переходу коллектор – эмиттер. На примере биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А показано, как можно решить задачу прогнозирования. Для выборки транзисторов этого типа с использованием результатов выполненного обучающего эксперимента получены два уравнения для описания рассматриваемого электрического параметра (статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером), по значению которого судят об отсутствии или наличии постепенного отказа для конкретного экземпляра. Первое уравнение показывает, как электрический параметр в среднем изменяется в зависимости от прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер электрического напряжения. Второе уравнение описывает в среднем деградацию электрического параметра при длительной наработке транзисторов. На основе этих двух уравнений получена имитационная модель надежности биполярных транзисторов рассматриваемого типа в виде функции связи, показывающей, какой уровень имитационного напряжения соответствует заданной наработке. Полученная имитационная модель применительно к транзисторам рассматриваемого типа позволяет выполнять индивидуальное прогнозирование надежности по постепенным отказам однотипных экземпляров, не принимавших участия в обучающем эксперименте. Для этого вначале определяют значение имитационного напряжения, соответствующее заданной наработке. Достигается это путем подстановки в модель заданной наработки. Индивидуальное прогнозирование надежности нового однотипного экземпляра состоит в измерении у этого экземпляра электрического параметра при напряжении на коллекторе транзистора, соответствующем рассчитанному имитационному значению, и сравнении результата измерения с нормой, установленной на электрический параметр.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, надежность по постепенным отказам, имитационное воздействие, индивидуальное прогнозирование надежности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность администрации и работникам Испытательного центра филиала «Завод Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ», при содействии которых были организованы измерения электрических параметров биполярных транзисторов на сертифицированных измерительных установках.

Для цитирования. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Бересневич А.И., Казючиц В.О. Индивидуальное прогнозирование надежности биполярных транзисторов с использованием электрического напряжения в качестве имитационного фактора. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 80-88.

INDIVIDUAL FORECASTING OF RELIABILITY OF BIPOLAR TRANSISTORS BY USING ELECTRICAL VOLTAGE AS A SIMULATION FACTOR

SERGEI M. BOROVIKOV, EVGENI N. SHNEIDEROV, ANDREI I. BERASNEVICH,
VLADISLAV O. KAZIUCHYTS

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

Submitted 6 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Individual forecasting of the reliability of semiconductor devices, taking into account gradual failures, is an urgent task, as it allows you to choose highly reliable instances for critical electronic devices of long-term functioning. In relation to bipolar transistors, an approach is proposed that allows us to solve this problem by using the voltage applied to the collector-emitter junction as a simulated effect. Using the example of high-power bipolar transistors of the KT872A type, it is shown how the problem is solved. For the sample of transistors of this type using the results of a training experiment, two equations were obtained to describe the electrical parameter under consideration (a static base current transfer coefficient in a circuit with a common emitter), the value of which judges the absence or presence of a gradual failure for a specific instance. The first equation shows how the electrical parameter changes on average depending on the voltage applied to the collector – emitter junction. The second equation describes the average degradation of the electrical parameter during long-term operating time of transistors. Based on these two equations, a simulation model of the reliability of bipolar transistors of the type in question is obtained in the form of a communication function that shows what level of simulation voltage corresponds to a given operating time. As applied to the transistors of the type under consideration, the obtained simulation model allows us to individually predict reliability by the gradual failures of the same type of samples that did not participate in the training experiment. To do this, first determine the value of the simulation voltage corresponding to a given operating time. This is achieved by substituting a given operating time into the model. The individual forecasting of the reliability of a new one-type instance consists in measuring the electrical parameter of this instance at a voltage on the transistor collector corresponding to the calculated simulation value, and comparing the measurement result with the norm set on the electrical parameter.

Keywords: semiconductor devices, reliability according to gradual failures, simulation effect, individual reliability prediction.

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

Gratitude. The authors are grateful to the administration and employees of the Testing Center of the Branch “Transistor Plant” of JSC “INTEGRAL” with whose assistance measurements of the electrical parameters of bipolar transistors were organized on certified measuring equipment.

For citation. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Berasnevich A.I., Kaziuchyts V.O. Individual forecasting of reliability of bipolar transistors by using electrical voltage as a simulation factor. *Doklady BGUIR*. 2020; 18(5): 80-88.

Введение

Одним из способов получения высоконадежной электронной аппаратуры длительного функционирования (аппаратура военной техники, обеспечения спутниковой связи, мониторинга экологической обстановки и др.) является постановка в электронные устройства экземпляров изделий электронной техники, в том числе биполярных транзисторов, требуемого уровня надежности по постепенным отказам. Под постепенным отказом в технической литературе понимают отказ, возникающий в результате постепенного (с течением времени) изменения значений одного или нескольких параметров прибора, в нашем случае биполярного транзистора.

Долю внезапных отказов приборов можно уменьшить путем улучшения технологических процессов при их изготовлении. Постепенные отказы, которые часто являются следствием внутренних необратимых изменений в материалах полупроводниковых приборов с течением времени (старение), в принципе исключить невозможно. Этим обусловлено внимание к постепенным (деградационным) отказам как биполярных транзисторов, так и полупроводниковых приборов в общем [1]. Известно, что такие изменения в материалах полупроводниковых приборов и, следовательно, постепенные отказы изделий с учетом этих изменений можно прогнозировать. При индивидуальном прогнозировании у конкретного экземпляра изделий рассматриваемого типа контролируются (измеряются) какие-то специфические параметры и по полученным их значениям принимается решение о надежности этого же экземпляра [1].

Одним из методов индивидуального прогнозирования надежности биполярных транзисторов является использование имитационных воздействий (факторов). В основе такого метода лежит статистическая аналогия между изменением (дрейфом) электрического параметра транзистора при длительной наработке и изменением этого же электрического параметра, вызываемым имитационным фактором [1, 2].

Актуальность разработки

В качестве первого имитационного воздействия (фактора) традиционно рассматривают температуру. Однако использование температуры как имитационного фактора для прогнозирования электрических параметров полупроводниковых приборов и, следовательно, их надежности по постепенным отказам связано с определенными производственными проблемами.

Одним из основных недостатков температуры является ее инертность, которая снижает производительность процедуры прогнозирования из-за временных затрат на установление и поддержание заданного значения имитационной температуры, воздействующей на полупроводниковое изделие. В ряде случаев может возникнуть необходимость проводить процедуру охлаждения прогнозируемого экземпляра до значения имитационного уровня температуры и поддерживать это значение температуры при измерении электрического параметра. Все это требует использования сложного технического оборудования.

Кроме того, как отмечается в работе [2], для некоторых электрических параметров биполярных транзисторов при использовании температуры в качестве имитационного фактора могут возникнуть случаи, когда большому диапазону наработок транзисторов будет соответствовать достаточно малый перепад имитационной температуры $T_{им}$. Это обстоятельство даже при малом отклонении температуры от номинального значения (в пределах погрешности) может привести к значительным ошибкам прогнозирования [1]. Например, для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ транзисторов КТ872А экспериментально установлено, что небольшой перепад воздействующей имитационной температуры $T_{им}$ соответствует диапазону наработок от 1000 до 20 000 ч (рис. 1). Из рис. 1 можно убедиться, что ошибка при прогнозировании электрического параметра транзистора может принять неприемлемое значение даже при отклонении поддерживаемой температуры на ± 2 К. Поэтому поиск альтернативных температуре имитационных факторов является актуальным.

В работе [2] было предложено использовать в качестве имитационного воздействия ток коллектора биполярного транзистора. При этом необходимо различать рабочий ток и имитационный ток коллектора. Рабочий ток коллектора – это то значение тока, которое имеет место при работе транзистора в электрической схеме. Имитационный ток используется только для получения применительно к конкретному экземпляру информации о возможном значении его электрического параметра при заданной длительной наработке.

Использование тока коллектора возможно не для всех электрических параметров биполярных транзисторов ввиду того, что имитационное значение тока, полученное по функции пересчета для интересующих наработок t_3 , может превышать предельно допустимое значение тока коллектора, приводимое в технической документации на биполярные

транзисторы рассматриваемого типа [1]. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость имитационного тока $I_{K\text{им}}$ от наработки t для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$ биполярных транзисторов КТ872А при рабочем токе коллектора $I_K = 7$ А. Для этого типа транзисторов предельно допустимое значение тока коллектора, указываемое в технической документации (ТУ), $I_{K\text{ТУ}} = 8$ А. Из рис. 2 видно, что при рабочем токе коллектора $I_K = 7$ А имитационное значение тока коллектора $I_{K\text{им}}$ выходит за пределы допустимого значения по ТУ ($I_{K\text{ТУ}} = 8$ А, коэффициент электрической нагрузки по току при $I_K = 7$ А равен 0,875). Поэтому в данном случае при выполнении индивидуального прогнозирования существует риск повреждения биполярных транзисторов.

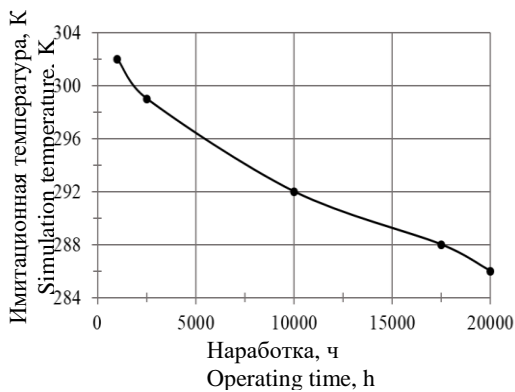


Рис. 1. Функция пересчета наработки t на значение имитационной температуры $T_{\text{им}}$

Fig. 1. The function of converting the operating time t to the value of the simulation temperature T_{sim}

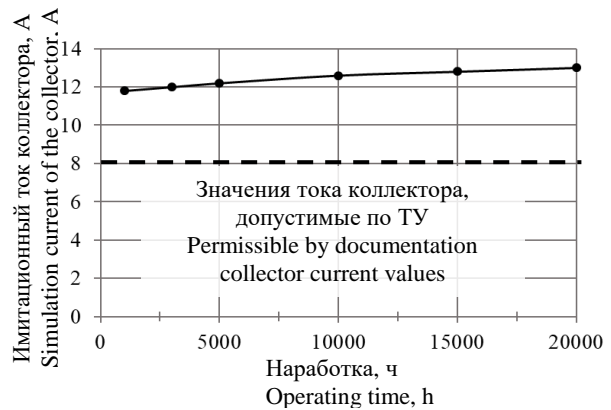


Рис. 2. Функция пересчета наработки t биполярных транзисторов типа КТ872А на значение имитационного тока коллектора $I_{K\text{им}}$ для параметра $h_{21Э}$ при рабочем токе $I_K = 7$ А

Fig. 2. The function of converting the operating time t of bipolar transistors of the КТ872А type to the value of the simulation current of the collector $I_{K\text{sim}}$ for parameter h_{21E} at an operating current of $I_K = 7$ А

Актуальность заключается в поиске других, альтернативных имитационных факторов, которые можно было бы использовать при прогнозировании надежности по постепенным отказам биполярных транзисторов в тех случаях, когда выбор в качестве имитационного фактора тока коллектора является недопустимым.

Теоретический анализ

В работах [1, 3] предлагается использовать напряжение, прикладываемое к $p-n$ -переходам биполярных транзисторов, в качестве альтернативного имитационного фактора. Теоретическим обоснованием возможности его использования как имитационного фактора является существование статистической аналогии между значениями напряжений, прикладываемых к $p-n$ -переходам биполярных транзисторов, и изменениями электрического параметра при длительной наработке. Это подтверждается экспериментальными данными, приводимыми в работах [1, 3], и рис. 3, на котором для электрического параметра $h_{21Э}$ биполярных транзисторов типа КТ872А приводится диаграмма разброса абсолютных изменений (обозначены как $\Delta h_{21Э}$), вызываемых сменой значения напряжения на переходе коллектор – эмиттер транзистора с 2 до 20 В, с одной стороны, и изменений $\Delta h_{21Э}$, обусловленных наработкой транзисторов в течение 15 000 ч, с другой стороны. Коэффициент линейной корреляции R между этими изменениями для исследуемой выборки транзисторов принял значение $R = -0,87$. Поэтому представляется возможным по значению электрического параметра $h_{21Э}$, измеренному при определенном уровне напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$, сделать прогноз электрического параметра и, следовательно, постепенного отказа конкретного экземпляра для заданной наработки t_3 . При этом необходимо различать «имитационное напряжение коллектор – эмиттер» и рабочее напряжение коллектор – эмиттер, обусловленное напряжением питания и электрическим режимом работы транзистора.

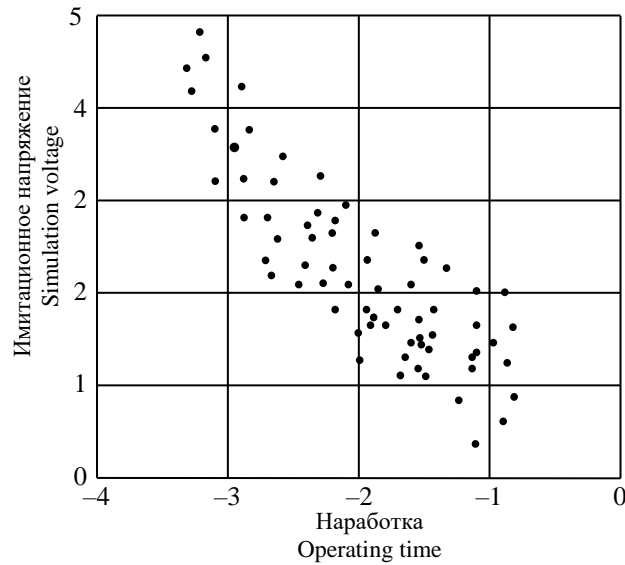


Рис. 3. Диаграмма разброса величин $\Delta h_{21Э}(U_{КЭ})$ и $\Delta h_{21Э}(t)$ биполярных транзисторов типа КТ872А, $R = -0,87$
Fig. 3. Scatter chart of $\Delta h_{21E}(U_{KE})$ and $\Delta h_{21E}(t)$ of КТ872А type bipolar transistors, $R = -0.87$

Для выполнения прогнозирования необходимо для интересующего электрического параметра получить имитационную модель в виде функции пересчета наработки t на значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$:

$$U_{КЭ\text{ им}} = f(t), \quad (1)$$

где f – символ функциональной связи.

Модель вида (1) получают один раз, выполняя предварительные исследования электрического параметра (обозначим через P), по значению которого судят о надежности биполярных транзисторов по постепенным отказам. Для получения этой модели используют определенную выборку интересующего типа транзисторов, которую называют обучающей выборкой.

Суть исследований. Вначале у экземпляров обучающей выборки измеряют значения интересующего электрического параметра при воздействии имитационного фактора (напряжения, прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер $U_{КЭ}$). Причем значения прикладываемых напряжений $U_{КЭ\text{ им}}$ (как уровней имитационного фактора) должны быть такими, чтобы у транзисторов не происходили необратимые изменения интересующего электрического параметра, то есть параметр должен принимать свое первоначальное значение после снятия имитационного воздействия. После этого обучающую выборку испытывают в течение заданной длительной наработки t_3 , обычно используя ускоренные форсированные испытания. При таких испытаниях происходит деградация рассматриваемого электрического параметра, процессы изменения электрических параметров транзисторов являются необратимыми. Далее, путем обработки полученных экспериментальных данных для экземпляров обучающей выборки получают две математические модели:

$$P = f_1(U_{КЭ}), \quad (2)$$

$$P = f_2(t), \quad (3)$$

где P – среднее значение рассматриваемого электрического параметра, то есть $P = P_{\text{ср}}$, нижний индекс «ср» здесь и далее для простоты записи опущен; f_1, f_2 – символы функциональной зависимости.

Функцию пересчета вида (1) получают, используя построенные модели (2) и (3). Полученная модель (1) будет использоваться для определения имитационного напряжения коллектор – эмиттер $U_{КЭ\text{ им}}$, соответствующего заданной наработке t_3 . Измерение электрического параметра конкретного экземпляра (транзистора) при напряжении коллектор – эмиттер, равном значению $U_{КЭ\text{ им}}$, даст ответ на вопрос о прогнозном значении электрического параметра

для заданной наработки t_3 . Зная норму на электрический параметр, можно принять решение о возможном постепенном отказе конкретного экземпляра для наработки t_3 и при необходимости отбраковать этот экземпляр как не соответствующий требованию надежности.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований использовались кремниевые эпитаксиально-планарные транзисторы большой мощности типа КТ872А, объем выборки 100 экземпляров. Экспериментальные исследования условно включали два этапа. На первом этапе у каждого экземпляра выборки в начальный момент времени снималась зависимость параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ при токе коллектора $I_K=0,1$ А. Второй этап заключался в проведении для выборки ускоренных форсированных испытаний на длительную наработку с периодическим (раз в несколько тысяч часов) контролем значений параметра $h_{21Э}$ каждого экземпляра.

Ускорение испытаний достигалось форсированием тепловой и электрической нагрузки [4]. При этом коэффициенты ускорения испытаний по каждой из нагрузок определялись соответственно по моделям Аррениуса и Пека. Итоговый коэффициент ускорения $K_y^{(T, U)}$ испытаний составил 69,5 [5].

Время проведения ускоренных форсированных испытаний было выбрано равным 216 ч, что эквивалентно 15 000 ч наработки транзисторов в обычных условиях.

Экспериментальная установка, используемая для проведения испытаний, представляла собой нагревательную печь с контролируемым и непрерывно поддерживаемым нагревом на уровне +150...200 °С (погрешность не более ± 2 °С). Также в состав установки были включены платы с испытываемыми транзисторами, источник питания (для обеспечения электрической нагрузки), вольтметр, амперметр (для контроля электрической нагрузки), плата предохранителей (для исключения останова испытаний при выходе из строя какого-либо экземпляра выборки), коммутационный термостойкий жгут и помехоподавляющие конденсаторы.

Результаты и их обсуждение

Используя экспериментальные зависимости электрического параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого электрического напряжения $U_{КЭ}$ всех экземпляров обучающей выборки, была получена усредненная зависимость параметра $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ (рис. 4). Значения параметра $h_{21Э}$, соответствующие каждой точке значения $U_{КЭ}$, получены усреднением $h_{21Э}$ по всем экземплярам обучающей выборки (100 штук).

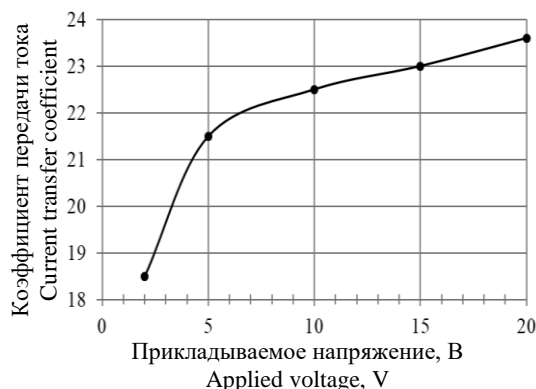


Рис. 4. Экспериментальная зависимость $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$
Fig. 4. Experimental dependence of h_{21E} on the applied voltage U_{KE}

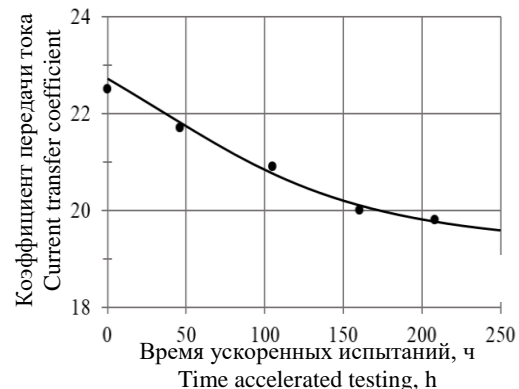


Рис. 5. Экспериментальная зависимость $h_{21Э}$ от времени ускоренных испытаний t_y
Fig. 5. Experimental dependence h_{21E} of accelerated testing time t_y

Для аналитического описания среднего значения $h_{21Э}$ от прикладываемого напряжения $U_{КЭ}$ получено выражение

$$h_{21Э} = 17,9 (U_{КЭ})^{0,097}. \quad (4)$$

На рис. 5 приведена усредненная зависимость параметра $h_{21Э}$ транзисторов типа КТ872А от времени проведения ускоренных форсированных испытаний t_y . Значения параметра $h_{21Э}$ для каждой точки наработки определены также усреднением $h_{21Э}$ по всем экземплярам (100 штук) исследуемой выборки. Вид модели (3) для параметра $h_{21Э}$ [1]:

$$h_{21Э} = \frac{1000}{0,00034t + 43}. \quad (5)$$

Используя модели (4) и (5), получена следующая функция пересчета заданной наработки t на значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$:

$$U_{КЭ\text{ им}} = \left(\frac{1000}{0,00609t + 769,7} \right)^{10,31}. \quad (6)$$

Прогнозирование параметра $h_{21Э}$ для однотипных транзисторов новых выборок выполняют, используя функцию пересчета (6). Для этого вначале для интересующей наработки t_3 рассчитывают имитационное напряжение $U_{КЭ\text{ им}}$. В табл. 1 приведены рассчитанные по функции (6) значения $U_{КЭ\text{ им}}$ для некоторых заданных наработок $t = t_3$.

Таблица 1. Значение имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$ (транзисторы типа КТ872А, параметр $h_{21Э}$)
Table 1. The value of the simulation voltage $U_{КЭ\text{ им}}$ (КТ872А transistors, parameter $h_{21Э}$)

Заданная наработка t_3 , ч Given operating time t_g , h	Значение $U_{КЭ\text{ им}}$, В Value $U_{КЭ\text{ им}}$, V	Заданная наработка t_3 , ч Given operating time t_g , h	Значение $U_{КЭ\text{ им}}$, В Value $U_{КЭ\text{ им}}$, V
3000	11,7	15 000	4,68
5000	9,96	20 000	3,27
10000	6,78	30 000	1,65

Для получения ответа на вопрос о значении параметра $h_{21Э}$, которое для заданной наработки t_3 будет иметь взятый для прогнозирования конкретный экземпляр (транзистор), необходимо у этого экземпляра измерить параметр $h_{21Э}$ при напряжении коллектор – эмиттер, равном рассчитанному значению $U_{КЭ\text{ им}}$. Результат измерения следует рассматривать в качестве прогноза параметра $h_{21Э}$ для наработки t_3 . Сравнивая прогнозное значение с нормой для $h_{21Э}$, записанной в документации или указанной потребителем, принимают решение о соответствии или несоответствии экземпляра требованию надежности по постепенным отказам для заданной наработки t_3 .

Анализируя данные табл. 1, можно убедиться, что при погрешности поддержания имитационного напряжения $U_{КЭ\text{ им}}$ в $\pm 0,1$ В ошибка в наработке, для которой получают прогноз параметра $h_{21Э}$, составит не более ± 4 %.

Заключение

С использованием экспериментальных данных установлено, что электрическое напряжение, прикладываемое к переходу коллектор – эмиттер биполярных транзисторов, может использоваться в качестве эффективного имитационного воздействия при решении задач прогнозирования электрических параметров для будущих наработок и, следовательно, принятия решения о соответствии экземпляра требованию надежности по постепенным отказам. Возможность использования в качестве имитационного воздействия (фактора) электрического напряжения, прикладываемого к переходу коллектор – эмиттер, была подтверждена и на примере других типов исследуемых биполярных транзисторов (КТ8271В, КТ8272В).

Список литературы

1. Боровиков С. М. *Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники*. Москва: Новое знание; 2013.
2. Боровиков С.М., Щерба А.И. Прогнозирование работоспособности полупроводниковых приборов методом имитационного моделирования. *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2004;4:37-40.
3. Боровиков С.М., Емельянов А.В., Бересневич А.И. Выбор имитационных факторов при прогнозировании отказов биполярных транзисторов. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2006;3:109-112.
4. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
5. Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н., Плебанович В.И., Бересневич А.И., Бурак И.А. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники. *Доклады БГУИР*. 2017;2(104):45-52.

References

1. Borovikov S. M. [Statistical forecasting for the rejection of potentially unreliable electronic products]. Moscow: New Knowledge; 2013. (In Russ.)
2. Borovikov S.M., Shcherba A.I. [Prediction of the health of semiconductor devices by the method of simulation]. *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technology in design and production*. 2004;4:37-40. (In Russ.)
3. Borovikov S.M., Emelyanov A.V., Beresnevich A.I. [The choice of simulation factors in predicting failure of bipolar transistors]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk = Proceedings of the NAS of Belarus. Physical-technical series*. 2006;3:109-112. (In Russ.)
4. Robinson L.E. Life expectancy in electronic components and 10th rule. *Testing*. 1998;1:16.
5. Borovikov S.M., Shneiderov E.N., Plebanovich V.I., Beresnevich A.I., Burak I.A. [An experimental study of the degradation of electronic products]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;2 (104):45-52. (In Russ.)

Вклад авторов

Боровиков С.М. разработал методику проведения исследования, выполнил постановку задач, а также анализ и интерпретацию полученных результатов.

Шнейдеров Е.Н. и Бересневич А.И. в равной степени экспериментально получили зависимости $h_{21E}(t_y)$ и $h_{21E}(U_{KE})$, изображенные на рис. 4 и 5, функцию пересчета (6), а также приняли участие в обсуждении результатов.

Казючиц В.О. организовал экспериментальную установку и выполнил изменения электрических параметров биполярных транзисторов.

Authors contribution

Borovikov S.M. developed the research methodology, formulated the problems, analyzed and interpreted the results obtained.

Shneiderov E.N. and Beresnevich A.I. experimentally obtained the dependences $h_{21E}(t_y)$ and $h_{21E}(U_{KE})$, shown in Fig. 4 and 5, recalculation function (6), and also took part in the discussion of the results.

Kaziuchyts V.O. organized an experimental installation and performed changes in the electrical parameters of bipolar transistors.

Сведения об авторах

Боровиков С.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е.Н., к.т.н., доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Borovikov S.M., PhD, Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shneiderov E.N., PhD, Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Бересневич А.И., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Beresnevich A.I., Master of Engineering, Senior Lecturer of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Казючиц В.О., магистр технических наук, ассистент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Kaziuchyts V.O., Master of Engineering, Assistant of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-38;
e-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-89-97>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.684.6;004.021

ГРАФОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКОВ

ПИЛЕЦКИЙ И.И., БАТУРА М.П., ШИЛИН Л.Ю.

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

Поступила в редакцию 9 июля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы, изложенной в статье, является рассмотрение и демонстрация применения графовых технологий для глубокого анализа данных. В статье рассматривается интеллектуальная система комплексного анализа данных интернет-источников и возможные направления ее дальнейшего развития. Данная система представляет собой многоцелевой кластер с использованием технологий построения графа знаний, методов и моделей машинного обучения для глубокого анализа данных интернет-источников (например, научных публикаций, социальных сетей, СМИ). Целью анализа является выявление наиболее важных публикаций в некоторой области (например, в робототехнике, космических исследованиях, здравоохранении, в социальной сфере), тематический анализ этих публикаций, выявление лидера научного направления, предсказание тенденций развития направлений и взаимодействия групп людей. При разработке данной системы были применены вероятностные алгоритмы машинного обучения и методы построения и обслуживания графовой модели социальной сети авторов и их публикаций, определение рейтинга конкретного автора публикаций, определение тематик публикаций и классификация их по областям знаний. Основой для создания интеллектуальных приложений являются графовые технологии, которые позволяют делать более точные прогнозы. Совместное применение методов и алгоритмов машинного обучения с графовыми технологиями позволяет получать скрытые зависимости и выполнять предиктивный анализ информации, получать ответы в режиме реального времени, реализовывать алгоритмы искусственного интеллекта. В основу методов совместной работы с графовыми технологиями и машинного обучения (например, применение нейронных сетей) положен графовый эмбединг. Данная технология позволяет выполнять всесторонний, глубокий и интеллектуальный анализ информации. Приведены аналитические отчеты, полученные с помощью графовых технологий в интеллектуальной системе комплексного анализа данных интернет-источников.

Ключевые слова: интернет-источники, мониторинг, машинное обучение, обработка естественного языка, графовые базы данных, графовые алгоритмы, pagerank.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилецкий И.И., Батура М.П., Шилин Л.Ю. Графовые технологии в интеллектуальной системе комплексного анализа данных интернет-источников. Доклады БГУИР. 2020; 18(5): 89-97.

GRAPHIC TECHNOLOGIES IN AN INTELLIGENT SYSTEM OF COMPLEX ANALYSIS OF DATA FROM INTERNET SOURCES

IVAN I. PILETSKI, MIKHAIL P. BATURA, LEANID Y. SHYLIN

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

Submitted 9 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work outlined in the article is to review and demonstrate the use of graph technologies for deep data analysis. The first part of the article discusses the Intelligent System for the Comprehensive Analysis of Internet Sources Data and its possible directions for its further development. This system is a multi-purpose cluster using technologies for constructing a knowledge graph, methods and models of machine learning for in-depth analysis of data from Internet sources (for example, scientific publications, social networks, media). The purpose of the analysis is to identify the most important publications in a certain area (for example, in robotics, space research, healthcare, in the social sphere), thematic analysis of these publications, to identify the leader of a scientific direction and to predict trends in the development of directions and interaction of groups of people. When developing this system, we utilized probabilistic machine learning algorithms and methods for constructing and maintaining a graph model of the social network of authors and their publications, determining the rating of a particular author, determining the topics of publications and classifying them by areas of knowledge. The basis for the creation of intelligent applications is graph technology, which allows you to make predictions that are more accurate. The combined application of methods and algorithms of machine learning with graph technologies allows you to get hidden dependencies and perform predictive analysis of information, get answers in real time, and implement artificial intelligence algorithms. Methods of collaboration with graph technologies and a learning machine (for example, using neural networks) are based on graph embedding. This technology allows you to perform a comprehensive, deep and intelligent analysis of information. At the end of the article, there are analytical reports obtained using graph technologies in the Intelligent System for Complex Analysis of Internet Sources Data.

Keywords: Internet sources, monitoring, data analysis, Machine Learning, Natural Language Processing, graph databases, graph algorithms, pagerank, graph technologies.

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

For citation. Piletski I.I., Batura M.P., Shylin L.Y. Graph technologies in an intelligent system of complex analysis of data from Internet sources. Doklady BGUIR. 2020; 18(5): 89-97.

Что такое ИСКАД ИИ?

Интеллектуальная система анализа данных интернет-источников (ИСКАД ИИ) предназначена для поддержки принятия обоснованных решений на основе *мониторинга и анализа данных* из открытых интернет-источников, обеспечения достоверности цифровой информации. Данная система представляет собой многоцелевой кластер с использованием технологий построения графа знаний, методов и моделей машинного обучения (Machine Learning – ML) для глубокого анализа данных интернет-источников (например, научных публикаций, социальных сетей, СМИ). Целью анализа является выявление наиболее важных публикаций в некоторой области (например, в робототехнике, космических исследованиях, здравоохранении, в социальной сфере), тематический анализ этих публикаций, выявление лидера научного направления, предсказание тенденций развития направлений и взаимодействия групп людей. В данной статье частично используются результаты, ранее полученные авторами и опубликованные в материалах международной конференции¹.

¹ Батура М.П., Пилецкий И.И., Прытков В.А., Волорова Н.А. Интеллектуальная система комплексного анализа данных интернет-источников: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Минск: БГУИР; 2020;1:220-241.

Анализируя данные из социальных сетей, можно выявить как прямые, так и скрытые отношения между людьми, группами людей, а также характер их взаимодействий. Примеры задач: выявление лидера профессионального или социального мнения, группы лиц, связанных в соцсетях по некоторой тематике, задачи рекламы (маркетинга) определенного товара или группы товаров, поиска экспертов и документов в некоторых научно-технических областях.

Основу технологии разработки системы составляют методы и алгоритмы построения и обслуживания графовой модели социальной сети авторов и их публикаций, ссылок на их публикации и определение рейтинга конкретного автора публикаций, определение тематик публикаций и классификация их по областям знаний.

Основным назначением графовой базы данных (БД) является применение графовых алгоритмов для обработки полученных данных, выстраивание логических взаимосвязей и подготовка и выдача информации для пользователя. Сама графовая БД обладает рядом преимуществ по сравнению с другими БД, она обладает свойствами OLTP и OLAP, поддерживает транзакции ACID (atomic, consistent, isolated and durable), чего не обеспечивает ни одна NoSQL БД. Графовые технологии являются основой для построения интеллектуальных приложений, для применения алгоритмов искусственного интеллекта.

В ИСКАД ИИ применена новая архитектура построения многофункциональных комплексов как набор постоянно работающих компонент в виде отдельных серверов. Все взаимосвязи и взаимодействия компонент организованы на основе специально разработанного управляющего компонента (универсальной шины) ИСКАД ИИ. Данный компонент обладает функциональностью интеграции данных и приложений, реализовывает функции брокера, синхронного и асинхронного выполнения приложений. Управляющий компонент реализовывает средства логирования, сбора статистики и мониторинга работы компонент системы. Компонент скачивания публикаций и компонент извлечения текста из материалов использует технологию Docker, инструменты мониторинга и предупреждения ошибок, применяет технологию извлечения медиа-данных из документов и обработки новых форматов документов (PostScript, заархивированные документы). Компонент графовая БД и граф знаний позволяет анализировать и выдавать информацию в аналитическом виде для принятия обоснованных решений. Компонент хранилища данных разработан на основе применения NoSQL СУБД, который может содержать различные тематические БД, соответствующие новым областям применения системы. Взаимодействие хранилища с графовой БД позволяет перестраивать и перезагружать граф знаний, иметь множественное представление графа знаний для различных областей применения. Библиотека аналитических модулей может пополняться новыми ML-модулями интеллектуального анализа данных.

ИСКАД ИИ позволяет не только помочь с проведением анализа и принятием решения, но и дает возможность сэкономить весьма дефицитный в условиях конкуренции ресурс – время. В современной экономике важно не только дать качественный продукт с новыми свойствами, но и сделать это в числе первых.

Графовые технологии как база интеллектуального анализа информации

В настоящее время резко возрос интерес к применению графовых алгоритмов и аналитики для различных областей человеческой деятельности. Графовые технологии – это основа для создания интеллектуальных приложений, позволяющих делать более точные прогнозы и быстрее принимать решения. Графы лежат в основе широкого спектра вариантов использования искусственного интеллекта (ИИ). Гибридная, транзакционная и аналитическая обработка может потенциально переопределить способ выполнения некоторых бизнес-процессов, поскольку расширенная аналитика в реальном времени (например, планирование, прогнозирование и анализ «что, если») становится неотъемлемой частью самого процесса, а не отдельной выполняемой операцией после факта (Gartner research).

Граф знаний – одна из основных областей ИИ, который позволяет понимать предписывающую аналитику и приложения ИИ (например, обработка и понимание естественного языка (Natural Language Processing – NLP, Natural-language understanding – NLU), определение PageRank).

В общем случае огромное количество графовых алгоритмов классифицированы на алгоритмы: Pathfinding, Centrality и Community Detection [1, 2]. Примеры классификации, визуализации и преобразования эмбединга можно найти на сайтах².

Pathfinding. Класс алгоритмов поиска кратчайших путей с учетом различных весовых критериев (например, расстояния или скорости). Например, найти самый быстрый маршрут для поездки, минимизировать трафик телефонных звонков.

Centrality. Данный класс алгоритмов (центральности) заключается в понимании того, какие узлы наиболее важные в сети. Эти алгоритмы позволяют определить, как быстро можно распространять информацию в различных группах и между группами сущностей, предсказать появление новых тенденций в этих группах, выявлять уязвимости и возможные цели атаки в сетях связи и транспорта.

Community Detection (обнаружение сообщества). Класс алгоритмов, позволяющий изучать различные социальные сети, выявлять лидеров этих сетей, определять количественные характеристики различных групп. Кроме того, данные алгоритмы позволяют оценивать иерархии, предсказывать тенденции поведения к видоизменению в этих группах, выявлять спамеров и потенциальных участников мошенничества.

Есть ряд задач, для решения которых может быть применена ML и различные алгоритмы без учителя, например, вероятностные алгоритмы или нейронная сеть, которые взаимодействуют с графами.

Совместное использование информации графовых моделей и ML позволяют получать скрытые зависимости и выполнять предиктивный анализ информации, получать ответы в режиме реального времени, реализовывать алгоритмы ИИ, отслеживать решения ИИ. В настоящее время алгоритмы ИИ широко распространены для решения конкретной задачи, например, автономное вождение автомобилей, управление различными дронами, автоматический поиск фото друзей на фотографиях и т. д. Для решения большинства из этих задач применяется графовая аналитика.

Графовая аналитика позволяет выявить закономерности в данных, например, в социальных данных, обнаружить сообщества или группу лиц, предсказать их поведение. Процесс глубокого обучения использует глубокие искусственные нейронные сети и ML в качестве моделей. В основу методов совместной работы с графами и ML технологиями (например, применение нейронных сетей) положен графовый эмбединг.

Графовый эмбединг это представление узлов и отношений в графе как вектор свойств. Графовые эмбединги – это способ представления графов для задач машинного обучения с помощью функции преобразования. В качестве значений вектора свойств могут быть выбраны некоторые атрибуты вершин и отношений. В зависимости от поставленной задачи эти свойства или атрибуты узлов и ребер могут быть разными. Данные ML технологии могут быть комбинированы с другими методами для улучшения аналитических результатов и нахождения скрытых зависимостей.

При работе с такими технологиями используются функции энкодер и декодер, функции кодирования и восстановления списка ребер и вершин по полученному представлению графа. Функция декодер позволяет визуализировать полученный результат в графическом виде, а также делать предсказание. Например, для взаимодействия графов и нейросетей можно использовать методы, которые находятся в свободном доступе: DeepWalk (word2vec), Node2Vec, 2D CNN, Graph Convolutional Networks.

Для построения преобразования эмбединга вершин необходимо:

- задать функцию соответствия преобразования узла u в вектор R^d ;
- определить функцию подобия узлов, меру близости в графе (например, скалярному произведению двух узлов);
- оптимизировать параметры функции подобия.

Для построения преобразования эмбединга для ребер нужно задать функцию, которая для любой пары вершин u и v построит векторное представление R^d вне зависимости от их связности на графе. Например, это может быть произведение Адамара или среднее

²Материалы по построению эмбединга доступны на сайтах: <https://arxiv.org/abs/1709.05584>, <https://arxiv.org/abs/1708.02218>, <https://arxiv.org/abs/1609.02907>.

арифметическое. На рис. 1 приведен пример многоуровневой схемы для моделирования связей между белками в разных органах (а они ведут себя по-разному в зависимости от местоположения) [3].

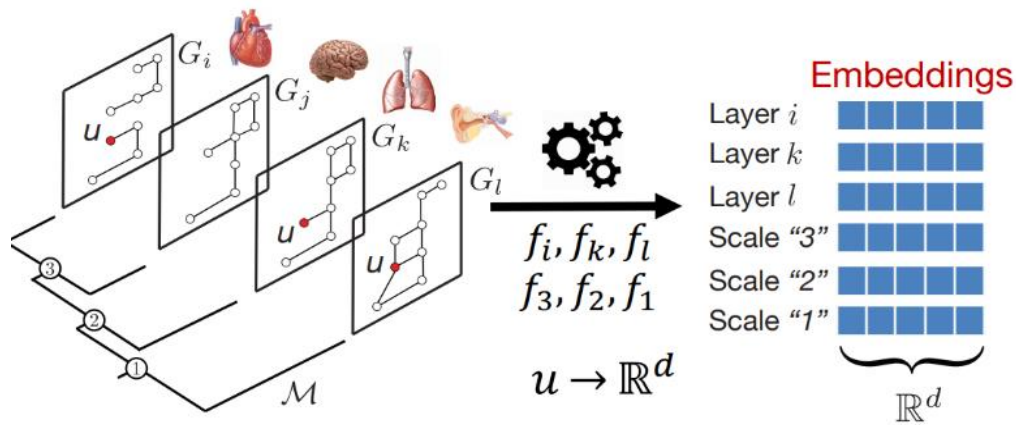


Рис. 1. Многоуровневое преобразование графовой модели в векторное представление
Fig. 1. Multilevel transformation of a graph model into a vector representation

Но при построении преобразования эмбединга для нейронных сетей существует проблема – это стандартная размерность входа. При работе с графами количество вершин может быть произвольным, поэтому необходимо преобразовывать матрицу связности до заданной размерности.

Применение графовых технологий в ИСКАД ИИ

В данном разделе приведена небольшая часть результатов работы ИСКАД ИИ с учетом важности публикаций и их тематик.

Графовая база данных ИСКАД ИИ содержит следующие сущности (см. рис. 2.):

- Author – тот, кто опубликовал статью;
- Publication – публикация, подготовленная автором. Содержит данные о публикации и ссылки на темы. Имеет ссылки на статьи, на которые ссылаются (LINKS_TO), необходимые для вычисления PageRank³ и определения эксперта в некоторой области знаний;
- Theme – тема, к которой может относиться публикация (темы публикаций определяются вероятностными алгоритмами ML);
- Token – сущность, которая представляет себя уникальным именем. Имеется возможность просмотреть все публикации, которые имеют в своем тексте вхождение ключевой фразы (хранится в связи FREQUENCY).

Объекты описанных сущностей связываются между собой следующими отношениями:

- WROTE – связывает автора и его статью;
- THEME_RELATION – отношение, обозначающее связь публикации с определенной тематикой;
- LINKS_TO – отношение между двумя объектами публикаций, обозначающее, что в тексте одной публикации есть ссылка на текст другой публикации;
- FREQUENCY – отношение, связывающее публикацию и токен. В дополнительном свойстве «entry_count» сохраняется число вхождений данного токена в текст публикации.

Схема структуры базы данных компонента графа знаний представлена на рис. 2.

³Алгоритм вычисления PageRank доступен на официальном сайте: neo4j <https://neo4j.com/docs/graph-algorithms/current/algorithms/page-rank/>.

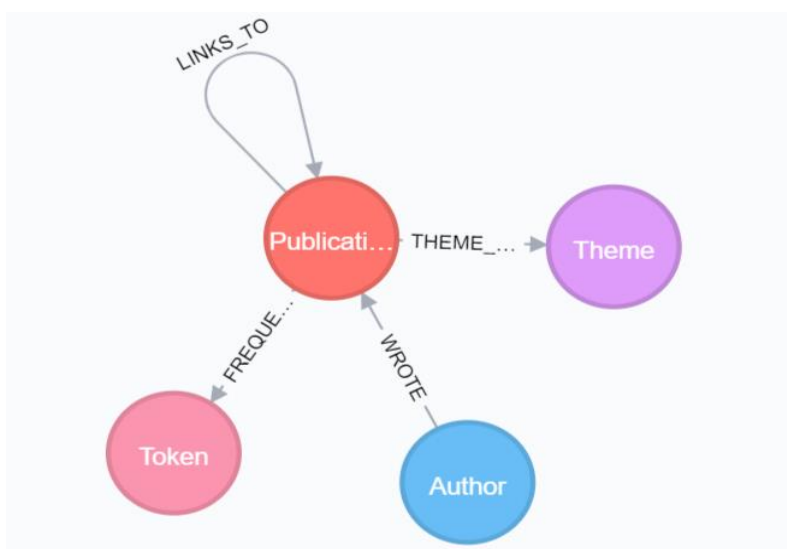


Рис. 2. Структура БД графа знаний
Fig. 2. Knowledge Graph Database Structure

Графовая модель позволяет получать знания о публикациях в различных аспектах, например, связанных с тематикой Computer science, Biology или Big Data. В таких запросах важно указывать порог вероятности тематики в статьях больше некоторой величины. Ниже приведены примеры получения аналитической информации из графовой базы данных. Необходимо отметить важное свойство всех отчетов – это drill down, т. е. информацию в отчете можно уточнять по каждой позиции простым нажатием курсора, по каждому узлу графа знаний. Данные получены с сайта, который используется для публикаций научных работ: <https://arxiv.org>, <http://libgen.io>, <http://gen.lib.rus.ec/>.

Поиск авторов, которых можно было бы назвать экспертами в каких-то областях знаний, основан на использовании рассчитанного для каждой публикации коэффициента PageRank, количества публикаций авторов и количества ссылок на публикации отдельного автора (рис. 3), динамика публикаций в областях знаний приведена на рис. 4.

Search for experts in particular domains

Computer science Biology Start typing

Start typing theme name and autocomplete will help you. Click on theme to remove it from the list.

Submit

Sort by References count

#	Author	Publications count	References Count
0	Hilda Butler, H. Butler	1	178
1	Elizabeth S. Allman, John A. Rhodes	2	165
2	Alan R. Aitkenhead BSc MD FRCA, David J. Rowbotham MD MRCP FRCA, Graham Smith BSc(Hon) MD FRCA	1	148
3	Leslie C. Grammer, Paul A. Greenberger	1	123
4	Nilsson N.J.	2	0
5	Г.И. Назаренко, Г.С. Осипов	2	0
6	Lodish H.	2	0

Рис. 3. Выбор «экспертов» предметной области
Fig. 3. The choice of subject area experts

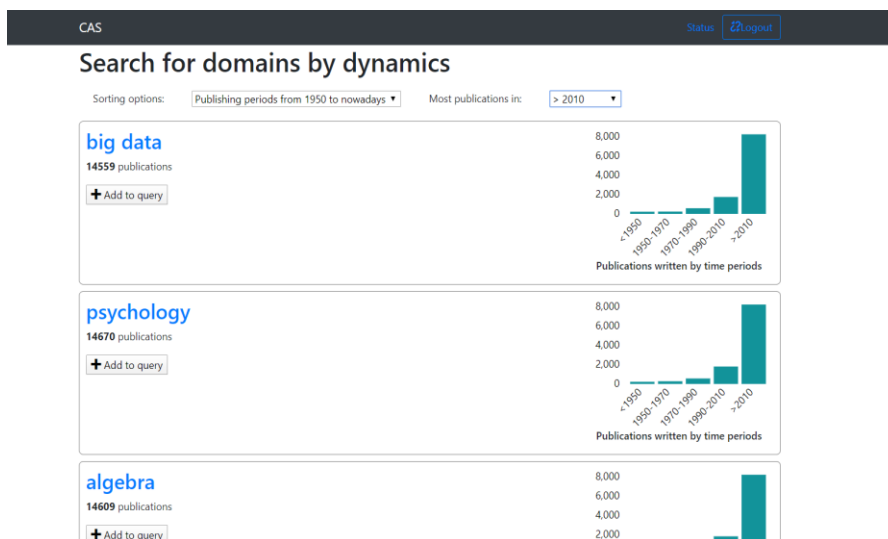


Рис. 4. Области знаний и число публикаций
Fig. 4. Knowledge Areas and Number of Publications

Информация об области знаний название области знаний, десять наиболее цитируемых публикаций, относящихся к ней, десять авторов, имеющих наибольшее число публикаций в данной области знаний, приведена на рис. 5.

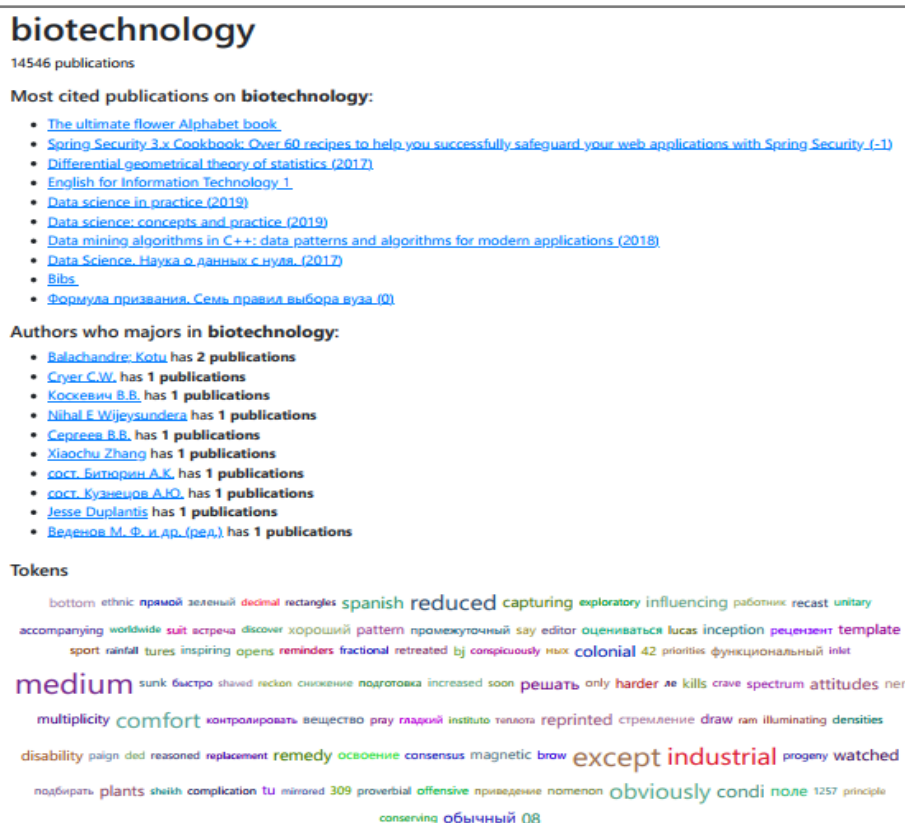


Рис. 5. Подробная информация о области знаний
Fig. 5. Detailed information about the field of knowledge

На рис. 6, 7 совмещены текстовая информация и граф, являющийся фрагментом графа знаний. На рис. 8 приведена подробная информация о публикациях отдельного автора. Важно еще раз отметить, что вся информация может быть уточнена с помощью техники drill down.

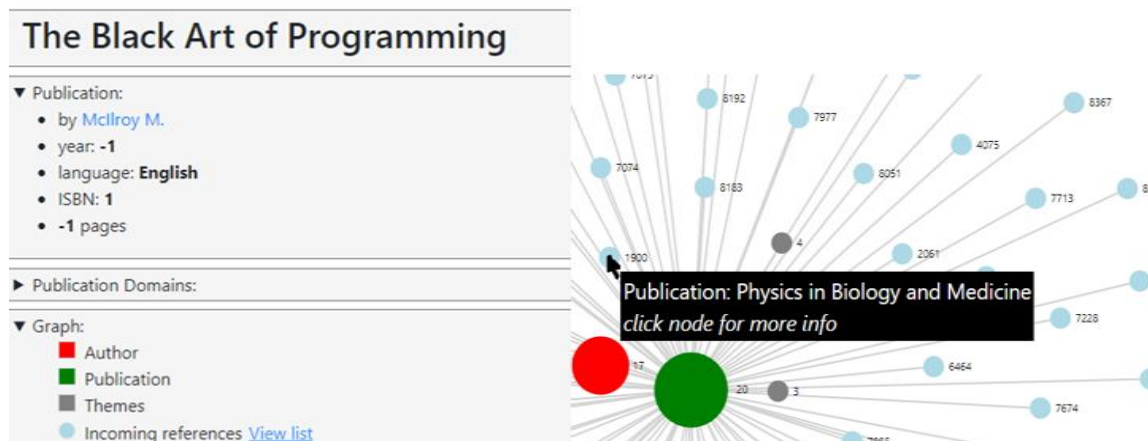


Рис. 6. Информация о конкретной публикации
Fig. 6. Information about a particular publication

Molecular Cell Biology. Glossary and index

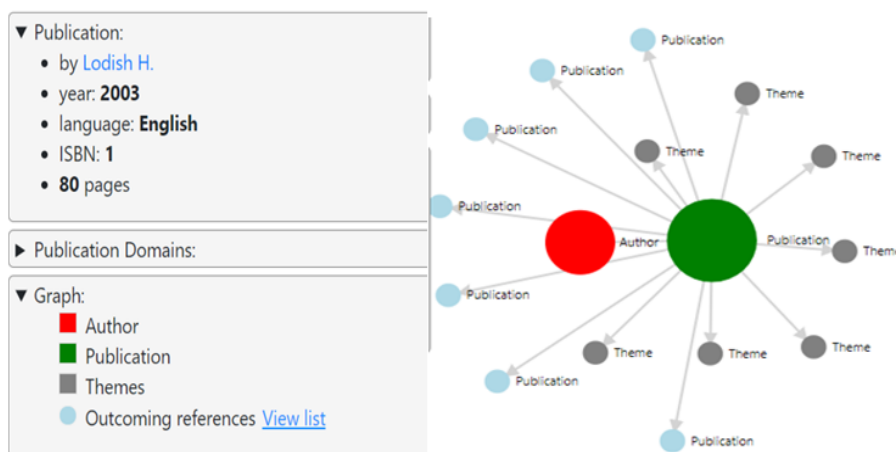


Рис. 7. Страница отдельной публикации
Fig. 7. Separate Publication Page

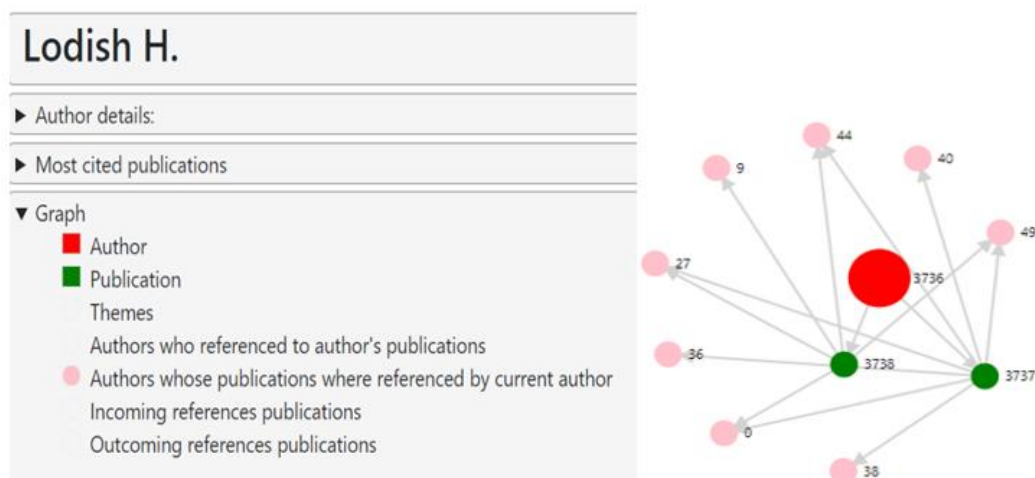


Рис. 8. Страница информации отдельного автора
Fig. 8. Page Information of Individual Author

Заклучение

В статье рассмотрены графовые технологии в ИСКАД ИИ, целью создания которой является выявление экспертов в некоторой предметной области, определение тематик публикаций, оценка их популярности. В современном мире крайне важным фактором является время, поэтому быстрое получение достоверного источника информации для принятия правильного решения является весьма актуальным. Проанализированы графовые технологии для создания интеллектуальных приложений на основе совместного применения графовых алгоритмов и ML с целью применения их в ИСКАД ИИ, что позволяет делать аналитические прогнозы и принимать более точные решения. Приведены реализованные технологические решения в проекте ИСКАД ИИ и показаны полученные аналитические результаты. Приведенные результаты работы используются при обучении магистрантов по тематике «Обработка больших объемов информации», подготовке специалистов «Data Scientist», а также для получения экспертных данных при проведении исследовательских работ в университете. Объем статьи не позволяет продемонстрировать более богатые возможности системы. Авторы статьи выражают благодарность студенту кафедры информатики БГУИР Н.Н. Черныш за помощь в подготовке рисунков.

References

1. Diestel R. *Graph Theory*. Berlin: Springer-Verlag; 2017.
2. Needham M., Hodler Amy E. *Graph Algorithms*. Sebastopol: O'Reilly Media; 2019.
3. Hamilton W.L., Rex Ying, Leskovec J. *Representation Learning on Graphs: Methods and Applications*. Stanford: Stanford University; 2017; 9:1-25.

Сведения о вкладе авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Author contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пилецкий И.И., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры информатики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, старший научный сотрудник.

Батура М.П., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией НИЛ 8.1 «Новые обучающие технологии» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шилин Л.Ю. д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий и управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Piletski I.I., PhD, Associate Professor of the Department of Informatics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Batura M.P., D.Sci., Professor, Head of the Research Laboratory 8.1 "New Learning Technologies" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shylin L.Y., D.Sci., Professor, Dean of the Faculty of Information Technologies and Control of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-632-32-35;
e-mail: bmpbel@bsuir.by
Батура Михаил Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka, str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-632-32-35;
e-mail: bmpbel@bsuir.by
Batura Mikhail

ПРИЛОЖЕНИЕ

В название и текст аннотации статьи «COVID-19 lethality rate may be affected by electromagnetic radio frequency pollution. 4G/5G/6G can be safe for people» автора В.И. Мордачева, опубликованной в Т. 18, № 4 журнала «Доклады БГУИР» (с. 96–112), были внесены изменения. В связи с этим титульный лист указанной статьи необходимо читать в следующей редакции.

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ УРОВНЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОПАСНОСТЬЮ COVID-19. 4G/5G/6G МОГУТ БЫТЬ БЕЗОПАСНЫМИ ДЛЯ ЛЮДЕЙ

МОРДАЧЕВ В.И.

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

Поступила в редакцию 15 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В работе рассматривается гипотеза о возможном, наряду с другими факторами, влиянии на уровень смертности населения от коронавирусной инфекции уровня электромагнитного загрязнения среды обитания. Гипотеза косвенно подтверждается наличием корреляции между степенью жесткости гигиенического нормирования уровней радиочастотного электромагнитного фона для населения, главным источником которого являются системы мобильной (сотовой) связи, и уровнем смертности от COVID-19 в различных странах. Обсуждаются специальные меры по обеспечению безопасного быстрого развития технологий, систем и услуг мобильной связи четвертого (4G), пятого (5G), а к 2030 году и шестого (6G) поколения, связанного с увеличением на несколько порядков числа излучающих устройств, скорости передачи данных по радиочастотным каналам и территориальной плотности трафика мобильной связи. Для количественного анализа этих процессов развита и верифицирована с использованием результатов многочисленных измерений электромагнитного фона в различных странах практическая методика пессимистической оценки уровня электромагнитного фона, создаваемого этими системами, основные положения которой излагаются в данной работе. Данная методика основана на использовании интегральных системных характеристик беспроводного информационного обслуживания общества и позволяет обосновать необходимые системные, технические и организационные решения, направленные на обеспечение необходимого уровня электромагнитной экологии населенных территорий и электромагнитной безопасности населения в условиях быстрого развития систем 4G/5G/6G без ущерба информационному обслуживанию населения и информационным технологиям в экономике, образовании, здравоохранении и других областях.

Ключевые слова: COVID-19, электромагнитное загрязнение, нормы, корреляция сотовая связь, 4G, 5G, 6G, электромагнитная экология, электромагнитная безопасность.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В.И. Корреляция между потенциальным уровнем электромагнитного загрязнения и опасностью COVID-19. 4G/5G/6G могут быть безопасными для людей. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 96-112.

CORRELATION BETWEEN THE POTENTIAL ELECTROMAGNETIC POLLUTION LEVEL AND THE DANGER OF COVID-19. 4G/5G/6G CAN BE SAFE FOR PEOPLE

VLADIMIR I. MORDACHEV

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

Submitted 15 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper considers a hypothesis concerned the possible influence of electromagnetic pollution of the environment on the lethality rate of the population from coronavirus infection, along with other factors. The hypothesis is indirectly confirmed by the correlation between the degree of rigidity of hygienic regulations of radio frequency electromagnetic background levels for the population, which are mainly created by mobile (cellular) communication systems, and the lethality rate from COVID-19 in various countries. A special measures to ensure the safety of rapid development of technologies, systems and services for mobile communications of the fourth (4G), fifth (5G), and, by 2030, the sixth (6G) generation, associated with an increase by several orders of magnitude in the number of radiating devices, the data transmission rates over radio frequency channels and the area capacity of mobile traffic, are discussed. For quantitative analysis of these processes, a practical method of worst-case estimation of electromagnetic background level generated by these systems has been developed, verified using the results of numerous measurements of the electromagnetic background in various countries, and described in this paper. This technique is based on the use of the integrated system characteristics of wireless information services and makes it possible to justify the necessary system, technical and managerial solutions aimed at ensuring the necessary level of electromagnetic ecology of populous areas and electromagnetic safety of people in conditions of rapid advancement of 4G/5G/6G systems without affecting the quality of informational support of the population and information technologies in economy, education, healthcare and other sectors.

Keywords: COVID-19, electromagnetic pollution, regulations, correlation, mobile communications, 4G, 5G, 6G, electromagnetic ecology, electromagnetic safety.

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

For citation. Mordachev V.I. Correlation between the potential electromagnetic pollution level and the danger of COVID-19. 4G/5G/6G can be safe for people. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 96-112.

