



H&ES RESEARCH

Научно-технический журнал

Scientific and Technical Journal

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ЗЕМЛИ

HIGH TECHNOLOGIES IN EARTH SPACE RESEARCH

Журнал **H&ES Research** издается с 2009 года, освещает достижения и проблемы российских инфокоммуникаций, внедрение последних достижений отрасли в автоматизированных системах управления, развитие технологий в информационной безопасности, исследования космоса, развитие спутникового телевидения и навигации, исследование Арктики. Особое место в издании уделено результатам научных исследований молодых ученых в области создания новых средств и технологий космических исследований Земли.

Журнал H&ES Research входит в перечень изданий, публикации в которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ), в систему российского индекса научного цитирования (РИНЦ), а также включен в Международный классификатор периодических изданий.

Тематика публикуемых статей в соответствии с перечнем групп специальностей научных работников по Номенклатуре специальностей:

- 05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника
- 05.12.00 Радиотехника и связь
- 05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ ЖУРНАЛА H&ES RESEARCH

- NEICON • CyberLenika (Open Science) • Google Scholar • OCLC WorldCat • Ulrich's Periodicals Directory • Bielefeld Academic Search Engine (BASE) • eLIBRARY.RU • Registry of Open Access Repositories (ROAR)

Все номера журнала находятся в свободном доступе на сайте журнала www.hes.ru и библиотеке elibrary.ru.

Всем авторам, желающим разместить научную статью в журнале, необходимо оформить ее согласно требованиям и направить материалы на электронную почту: HT-ESResearch@yandex.ru.

С требованиями можно ознакомиться на сайте: www.H-ES.ru.

Язык публикаций: русский, английский.

Периодичность выхода – 6 номеров в год.

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-60899 от 02.03.2015

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Тираж 1000 экз. Цена 1000 руб.

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается.

© ООО «ИД Медиа Паблшер», 2021

H&ES Research is published since 2009. The journal covers achievements and problems of the Russian infocommunication, introduction of the last achievements of branch in automated control systems, development of technologies in information security, space researches, development of satellite television and navigation, research of the Arctic. The special place in the edition is given to results of scientific researches of young scientists in the field of creation of new means and technologies of space researches of Earth.

The journal H&ES Research is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses. IF of the Russian Science Citation Index.

Subject of published articles according to the list of branches of science and groups of scientific specialties in accordance with the Nomenclature of specialties:

- 05.07.00 Aviation, space-rocket hardware
- 05.12.00 RF technology and communication
- 05.13.00 Informatics, computer engineering and control.

JOURNAL H&ES RESEARCH INDEXING

All issues of the journal are in a free access on a site of the journal www.hes.ru and elibrary.ru.

All authors wishing to post a scientific article in the journal, you must register it according to the requirements and send the materials to your email: HT-ESResearch@yandex.ru.

The requirements are available on the website: www.H-ES.ru.

Language of publications: Russian, English.

Periodicity – 6 issues per year.

Media Registration Certificate PI No. FS77-60899. Date of issue: March 2, 2015.

Distribution Territory: Russian Federation, foreign countries

Circulation of 1000 copies. Price of 1000 Rub.

Postgraduate students for publication of the manuscript will not be charged

© "Media Publisher", LLC 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Учредитель:

ООО "ИД Медиа Паблишер"

Издатель:

ДЫМКОВА С.С.

Главный редактор:

ЛЕГКОВ К.Е.

Редакционная коллегия:

БОБРОВСКИЙ В.И., д.т.н., доцент;

БОРИСОВ В.В., д.т.н., профессор,
Действительный член академии военных наук РФ;

БУДКО П.А., д.т.н., профессор;

БУДНИКОВ С.А., д.т.н., доцент,

Действительный член Академии информатизации образования;

ВЕРХОВА Г.В., д.т.н., профессор;

ГОНЧАРОВСКИЙ В.С., д.т.н.,

профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ;

КОМАШИНСКИЙ В.И., д.т.н., профессор;

КИРПАНЕВ А.В., д.т.н., доцент;

КУРНОСОВ В.И., д.т.н., профессор,

академик Международной академии информатизации, Действительный член Российской академии естественных наук;

МОРОЗОВ А.В., д.т.н., профессор,

Действительный член Академии военных наук РФ;

МОШАК Н.Н., д.т.н., доцент;

ПАВЛОВ А.Н., д.т.н., профессор;

ПРОРОК В.Я., д.т.н., профессор;

СЕМЕНОВ С.С., д.т.н., доцент;

СИНИЦЫН Е.А., д.т.н., профессор;

ШАТРАКОВ Ю.Г., д.т.н., профессор,
заслуженный деятель науки РФ.

Адрес издателя:

111024, Россия, Москва,

ул. Авиамоторная, д. 8, корп. 1, офис 323.

Адрес редакции:

194044, Россия, Санкт-Петербург,

Лесной Проспект, 34-36, к. 1,

Тел.: +7(911) 194-12-42.

Адрес типографии:

Россия, Москва, ул. Складочная, д. 3,

кор. 6.

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет.

Материалы, опубликованные в журнале – собственность ООО "ИД Медиа Паблишер".

Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Абрамкин Р.В.

Обобщенная модель функционирования центра связи в условиях отказов элементов системы электроснабжения

4

Либеровский Н.Ю., Припутин В.С., Чиров Д.С.

Обзор исследований адаптивного формирования диаграммы направленности и цифровой обработки сигналов

16

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Миронов Ю.Б., Казанцев С.Ю., Шаховой Р.А., Колесников О.В., Машковцева Л.С., Зайцев А.И., Коробов А.В.

Анализ перспектив развития источников одиночных фотонов в системах квантового распределения ключей

22

Поспелов П.И., Таташев А.Г., Терентьев А.В., Карелина М.Ю., Яшина М.В.

Потоки Бартлетта и математическое описание автотранспортных потоков

34

Мишин А.Б., Морковин С.В.

Модифицированный метод внедрения робастного невидимого цифрового водяного знака в видеоданные

42

Тихонов В.А., Новиков В.А.

Верификация систем управления доступом на основе моделирования раскрашенными сетями Петри

50

Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н.

Интеграция средств анализа и исполнения бизнес-процессов на основе блочного подхода

60



CONTENTS

RF TECHNOLOGY AND COMMUNICATION

Abramkin R.V.

A generalized model of the functioning of a field communication node in the conditions of failures of elements of the power supply system

4

Liberovskiy N.Y., Priputin V.S., Chirov D.S.

A review of research on adaptive beamforming and digital signal processing

16

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND CONTROL

Mironov Y. B., Kazantsev S. Y., Shakhovoy R. A., Kolesnikov O. V., Mashkovtseva L. S., Zaitcev A. I., Korobov A. V.

Analysis of single photon sources with quantum key distribution systems development prospects

22

Pospelov P.I., Tatashev A.G., Terentyev A.V., Karelina M.Yu., Yashina M.V.

Bartlett flows and mathematical description of motor traffic flows

34

Mishin A.B., Morkovin S.V.

Modified method of implementing a robust invisible digital water SIGN into video data

42

Tikhonov V.A., Novikov V.A.

Verification of access control systems based on modeling with colored Petri nets

50

Vasiliev N.V., Yashin A.I., Dovzhikov S.N.

Integration of execution, process mining and performance analysis of business processes based on a block approach

60

Founder:

"Media Publisher", LLC

Publisher:

DYMKOVA S.S.

Editor in chief:

LEGKOV K.E.

Editorial board:

BOBROWSKY V.I., PhD, Docent;
BORISOV V.V., PhD, Full Professor;
BUDKO P.A., PhD, Full Professor;
BUDNIKOV S.A., PhD, Docent,
Actual Member of the Academy of
Education Informatization;
VERHOVA G.V., PhD, Full Professor;
GONCHAREVSKY V.S., PhD, Full
Professor, Honored Worker of Science
and Technology of the Russian Federation;
KOMASHINSKIY V.I., PhD, Full Professor;
KIRPANEV A.V., PhD, Docent;
KURNOSOV V.I., PhD, Full Professor,
Academician of the International Academy
of Informatization, law and order, Member
of the Academy of Natural Sciences;
MOROZOV A.V., PhD, Full Professor,
Actual Member of the Academy of Military
Sciences;
MOSHAK N.N., PhD, Docent;
PAVLOV A.N., PhD, Full Professor;
PROROK V.Y., PhD, Full Professor;
SEMENOV S.S., PhD, Docent;
SINICYN E.A., PhD, Full Professor;
SHATRAKOV Y.G., PhD, Full Professor;
Honored Worker of Science of the Russian
Federation.

Address of publisher:

111024, Russia, Moscow,
st. Aviamotornaya, 8, bild. 1, office 323;

Address of edition:

194044, Russia, St. Petersburg,
Lesnoy av., 34-36, h.1,
Phone: +7 (911) 194-12-42.

Address of printing house:

Russia, Moscow, st. Skladochnaya, 3, h. 6

The opinions of the authors don't always coincide with the point of view of the publisher. For the content of ads, the editorial Board is not responsible. All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock company.

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-4-15

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРА СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

АБРАМКИН
Роман Викторович¹

АННОТАЦИЯ

Введение: функционирование центра связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов представляет собой сложный процесс, описание которого является нетривиальной задачей. Случайный характер воздействия, а также важность системы электроснабжения определяют необходимость создания модели, позволяющей адекватно описывать процесс функционирования как самого центра, так и его элементов. **Цель работы** заключается в разработке модели функционирования центра связи в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов – отказов элементов системы электроснабжения. **Используемые методы:** применение аппарата топологического преобразования стохастических сетей с вероятностным методом сетевого планирования (GERT) в области исследования функционирования центра связи с учетом воздействия отказов элементов системы электроснабжения позволяет адекватно описывать функционирование как элементов (с учетом особенностей способа организации электропитания), так и самого центра связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, выражающееся в его функциях распределения времени восстановления и сохранения работоспособного состояния. **Новизна работы** заключается в том, что учитываются особенности порядка организации электропитания каждого элемента центра; дестабилизирующие факторы - отказы элементов системы электроснабжения, в результате которых возможно нарушение или прекращение функционирования центра, что позволяет определять вероятностно-временные характеристики функционирования его элементов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов; особенности и вероятностно-временные характеристики процесса восстановления работоспособного состояния элементов центра, включающего ряд мероприятий по переходу на автономные источники, электростанцию холодного резерва, источники питания других потребителей. **Результат:** представленная модель позволяет оценить надежность функционирования центра связи и его элементов в условиях отказов элементов системы электроснабжения на основании имеющихся исходных данных. **Практическая значимость:** представленная модель является универсальной и может быть применена для любого центра связи.

Сведения об авторе:

¹ адъюнкт 42 кафедры, Военная академия связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург, Россия, avg62rus@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модель функционирования, топологическое преобразование стохастических сетей, надежность, центра связи, элемент системы электроснабжения, дестабилизирующие факторы.

Для цитирования: Абрамкин Р.В. Обобщенная модель функционирования центра связи в условиях отказов элементов системы электроснабжения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 4-15. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-4-15



Введение

Модель функционирования центра связи (ЦС) представляет собой систему, в которой в соответствии с законом отражаются какие-либо его характеристики. В различных представлениях центр связи определяется заданием некоторой совокупности множеств элементов, связанных между собой рядом отношений, удовлетворяющих тем или иным правилам сочетания, как элементов этих множеств, так и самих отношений. Для формального описания функционирования центра связи должна существовать, по крайней мере, возможность формального описания его структуры. Центр связи является структурируемой и формализуемой системой.

Среда функционирования центра связи определяется совокупностью его элементов, оказывающих на центр связи дестабилизирующее воздействие. К таким воздействиям, в первую очередь, следует отнести отказы элементов системы электроснабжения.

Существующие модели функционирования сетей (центров) связи в большинстве своем рассматривали устойчивость в ключе живучести и помехоустойчивости. При этом, надежные характеристики принимались за постоянные величины и выводились в ограничения. Модели, в которых рассматривались вопросы надежности сети, учитывали лишь структурные особенности самой сети и функциональные особенности ее элементов (техники связи). Модели непосредственно систем электроснабжения центров связи, в основном, рассматривали систему электроснабжения (СЭС) обособленно, т.е. как самостоятельную систему сети (центра) связи, и не учитывали особенности ее влияния на сеть (центр) связи. Предлагаемый в работе подход позволяет рассматривать элементы системы электроснабжения непосредственно как подсистему центра связи, и оценивать влияние их отказов на надежность функционирования центра связи. Помимо вышесказанного, отличительной чертой данной модели, которая составляет её научную новизну, является учет длительности переходных режимов восстановления связи при переходе элемента ЦС в состояние неработоспособности из-за отказов СЭС, особенностей организации электропитания каждого элемента ЦС, а также этапов перехода в состояние неработоспособности (в проекции на его структуру его элемента СЭС).

В связи с этим задача моделирования функционирования центра связи в условиях отказов элементов СЭС является актуальной. Предлагаемый подход предполагает рассмотрение центра связи с точки зрения надежности его функционирования в условиях отказов элементов СЭС.

Постановка задачи на разработку модели

Представленная модель предназначена для исследования надежности функционирования ЦС на основе выявления взаимосвязи структурных и функциональных свойств его элементов с учетом отказов элементов СЭС и процессов восстановления. То есть, для определения вероятностно-временных характеристик функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС с учетом особенностей организации электропитания каждого элемента ЦС, а также этапов перехода в состояние неработоспособности (в проекции на его структуру его элемента СЭС), с целью построения дальней-

шего вектора исследования на предмет повышения надежности функционирования ЦС.

Представленная задача моделирования сводится к оценке надежности функционирования (НФ) центра в условиях отказов элементов СЭС и имеет важное практическое значение. Научно обоснованное решение этой проблемы является одним из основных условий обеспечения высокой эффективности функционирования центра связи и связано с определением показателей оценки надежности функционирования, а также с созданием моделей для оценки показателей этой характеристики. К настоящему времени развитие получили лишь методы расчета структурной надежности.

Исследования с целью определения надежности функционирования производятся на основе математических моделей, реализуемых различными методами. Наибольшее распространение находят схемно-графические модели, основой для построения которых служит топология центра, представленная в виде графа, раскрывающая взаимное расположение его элементов, связи между ними, и другие сведения.

Таким образом, задача моделирования функционирования центра связи с учетом воздействия отказов элементов СЭС, как процесса, включает в себя ряд основных этапов: выбор и обоснование показателей, характеризующих надежность функционирования ЦС; формализация показателей, характеризующих функционирование ЦС; обоснование состава модели функционирования ЦС; содержательное описание функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС; разработка аналитической модели функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС.

Под надежностью функционирования понимается его способность противостоять нарушениям отношений между ее элементами при помощи соответствующим образом организованной структуре. В соответствии с существующими стандартами показателем надежности функционирования ЦС является значение вероятности связности, под которым понимается вероятность того, что существует хотя бы один путь, по которому возможно установление соединения между вершинами графа сети центра. Таким образом, показатели надежности могут быть определены через показатели связности графа, формализующего сеть связи центра в виде множеств вершин и ребер [1], исходя из ее функционально-топологической структуры, определяемой организационно-техническим построением центра связи.

Реализация модели функционирования центра связи в условиях отказов элементов системы электроснабжения

Обоснованный переход к оценке надежности функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС позволяет говорить о системе электроснабжения ЦС как об одной из главных подсистем ЦС, поскольку, согласно устоявшимся подходам к оценке надежности, показатели самих средств и комплексов связи оказывают несущественное влияние на функционирование ЦС в целом.

В свою очередь достаточное количество методов повышения устойчивости функционирования сетей связи, рассматривающих только вопросы живучести и помехоустойчивости (надежность в данном случае обеспечивается лишь за счет топологии построения самой сети), недостаточная

проработанность методов обеспечения надежности функционирования ЦС в условиях воздействия отказов элементов СЭС, а также подкрепленная практикой необходимость учета влияния воздействия элементов СЭС на надежность функционирования ЦС, позволяет говорить об актуальности выбранного направления исследования [2-4].

Предлагаемый подход предполагает рассмотрение элементов системы электроснабжения непосредственно как подсистемы центра связи, и оценивание влияния их отказов на надежность функционирования центра связи с учетом длительности процесса восстановления связи при переходе элемента ЦС в состояние неработоспособности из-за отказов СЭС.

Количественной мерой, характеризующей надежность функционирования ЦС, является вероятность связности, которая определяется коэффициентом оперативной готовности. Оценка по вышеуказанным показателям элементов ЦС включает в себя среднее время восстановления и вероятность сохранения работоспособного состояния элемента ЦС при воздействии отказов СЭС. В то же время расчет перечисленных выше показателей связан с определением соответствующих вероятностно-временных характеристик процессов функционирования ЦС в конкретной обстановке. Особенности функционирования ЦС проявляются в форме зависимости значения вероятности сохранения работоспо-

собности его элементов при воздействии дестабилизирующих факторов (ДФ) от временных интервалов прекращения функционирования элемента и временных интервалов восстановления нормального функционирования элемента ЦС [5-7]. Таким образом, многоуровневый характер процесса функционирования ЦС в условиях воздействия отказов элементов СЭС требует разработки ряда частных моделей. Полученные в ходе частного моделирования результаты будут являться входными для комплексной модели функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС. В качестве выходных данных модели являются исследуемые показатели надежности функционирования ЦС.

В соответствии с поставленной задачей предлагается для ее решения использовать следующую структуру модели, которая представлена на рисунке 1.

Основными элементами модели функционирования центра связи в условиях отказов элементов СЭС являются: модель функционирования элементов ЦС одноканальной схемы электропитания, модель функционирования элементов ЦС двухлучевой схемы электропитания, модель процесса восстановления связи при переходе элемента ЦС в состояние неработоспособности из-за отказов СЭС.

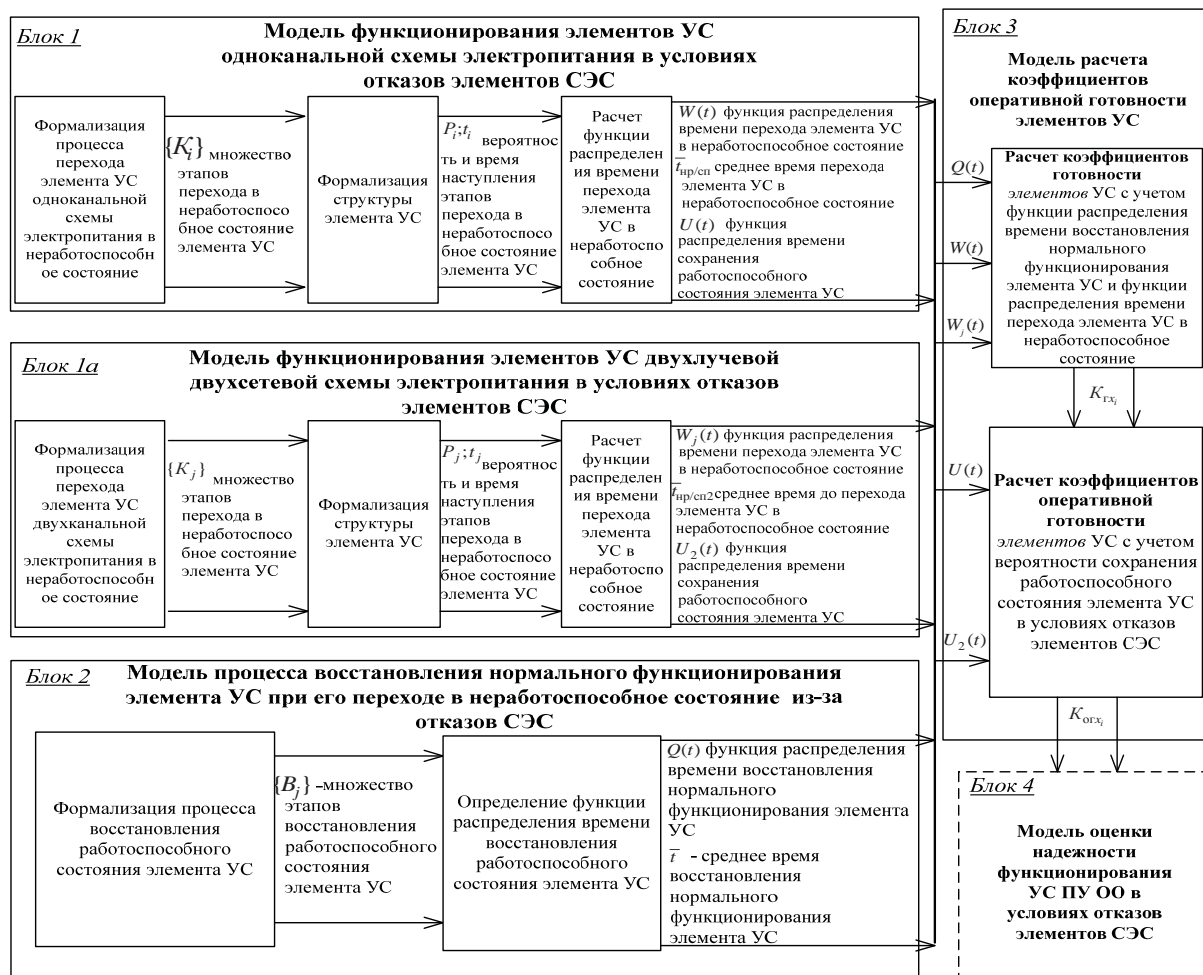


Рис. 1. Структура модели функционирования ЦС с учетом отказов элементов СЭС

Особенностью разработанной модели является её блочная структура, что позволяет моделировать каждый частный процесс функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС.

Реализация блока №1 на основе применения математического аппарата исследования стохастических сетей [8] с процедурой *GERT*, позволяет определить функции распределения времени перехода элемента ЦС одноканальной схемы питания в состояние неработоспособности, среднее время до перехода элемента ЦС в состояние неработоспособности, а также функции распределения времени сохранения работоспособного состояния данного элемента ЦС и использовать их в качестве исходных данных для блока №3.

Аналогичным образом реализован блок №1а. Основное отличие заключается в том, что рассматривается процесс перехода в состояние неработоспособности элемента ЦС, питание которого организовано по двухлучевой схеме, следовательно, алгоритм процесса существенно отличается от алгоритма блока №1. Выходными данными блока №1а являются функция распределения времени перехода элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания в состояние неработоспособности, среднее время до перехода элемента ЦС в состояние неработоспособности, а также функции распределения времени сохранения работоспособности этого элемента ЦС. Полученные данные в результате реализации блока №1а являются входными для блока №3.

На основе выбранного математического аппарата в блоке №2 реализована модель процесса восстановления связи при переходе элемента ЦС в состояние неработоспособности из-за отказов СЭС, позволяющая определить среднее время процесса восстановления, включающего ряд мероприятий по переходу на работу от автономных источников, централизованной электростанции холодного резерва, источников других потребителей. Полученные результаты используются в качестве исходных для блока №3.

Результаты, полученные в блоке №3 для каждого элемента ЦС, являются входными для блока №4.

На основе применения аппарата теории надежности в блоке №4 реализован подход, позволяющий определить количественную оценку надежности функционирования ($K_{ог}$) ЦС в условиях отказов элементов СЭС.

С учетом частных моделей (блоки №1, №1а, №2, №3, №4) разработана аналитическая модель функционирования центра связи с учетом воздействия дестабилизирующих факторов и восстановления нарушенных связей (путем восстановления электропитания).

Для оценки надежности функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС, предлагается осуществить преобразование исходного графа ЦС к виду его надежностной схемы, представленной на рисунке 2. В основе данного преобразования лежит подход, согласно которому под элементом ЦС понимается совокупность аппаратных и их централизованного источника (источников) электропитания.

На рисунке 2 $x_1 \dots x_7$ обозначены элементы ЦС, полученные в результате объединения вершин исходного графа по принципу организации электроснабжения ЦС.

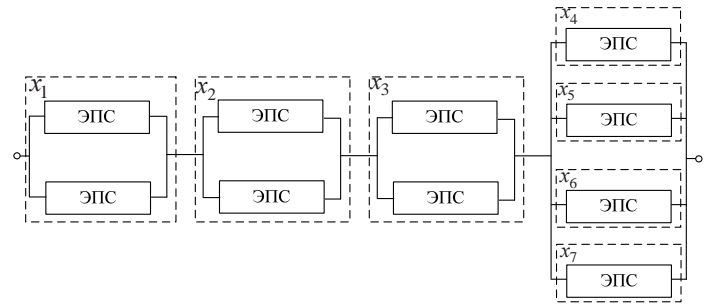


Рис. 2. Структурная схема надежности ЦС

Электропитание элементов $x_1 \dots x_3$ осуществляется по двухлучевой схеме, поэтому на рисунке 2 представлено параллельное соединение элементов СЭС. Сами же элементы ЦС $x_1 \dots x_3$ включены в общей надежностной схеме последовательно, поскольку нарушение работоспособности любого из них приводит к прекращению функционирования ЦС, то есть приводит к нарушению вершинной связности исходного графа ЦС. Электропитание элементов $x_4 \dots x_7$ осуществляется по одноканальной (однолучевой) схеме, при которой одному элементу ЦС соответствует один централизованный элемент СЭС. Элементы ЦС $x_4 \dots x_7$ включены параллельно в общей надежностной схеме, поскольку прекращение работоспособности какого-либо из них не приводит к вершинной несвязности.

Исходя из схемы, представленной на рисунке 2, можно сделать вывод о том, что функционирование элементов ЦС будет определяться состоянием их элементов системы электроснабжения, поскольку отказы СЭС неизбежно приводят к нарушению функционирования элемента ЦС, что влечет за собой нарушение связи.

Процесс перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС характеризуется этапами перехода в неработоспособное состояние элемента СЭС [9-10]. Это определяется тем, что элемент СЭС представляет собой электростанцию централизованного питания, которая включает себя три источника: электроагрегат (ЭА) №1, электроагрегат №2 и электроустановку отбора мощности (ЭУОМ) от двигателя шасси. При переходе первого источника питания в предотказное состояние осуществляется переход на другой источник (ЭА №2, либо ЭУОМ). Переход на работу от другого источника питания рассматривается именно в момент наступления предотказного состояния первого, поскольку это состояние характеризуется повышенным риском отказа. Отказ неизбежно приведет к останову агрегата и, как следствие, нарушению связи. Поэтому, с целью осуществления безобрывного питания потребителей (аппаратных), переход на другой источник осуществляется именно в момент перехода в предотказное состояние первого. Переход в состояние неработоспособности всего элемента ЦС будет определяться прекращением возможности выработки электроэнергии элементом СЭС в проекции на его структуру.

Представляемая модель функционирования элементов ЦС в условиях отказов элементов СЭС позволяет определять вероятностно-временные характеристики, описывающие

функции распределения времени сохранения работоспособного состояния, как элементов, так и всего ЦС с учетом специфики перехода в состояние неработоспособности отдельных элементов ЦС.

Рассмотрим более подробно процесс перехода в состояние неработоспособности элемента ЦС однолучевой схемы электропитания. Алгоритм данного процесса в проекции на структуру элементов СЭС представлен на рисунке 3.

Начальное состояние характеризуется работой от агрегата №1 и его работоспособным состоянием. В ходе работы возможен его переход в предотказное состояние. Время, затрачиваемое на переход агрегата №1 в предотказное состояние, является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В результате перехода агрегата №1 в предотказное состояние, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_1 перехода на работу от агрегата №2. В противном случае (если по каким-либо причинам переход на агрегат №2 не состоялся) с вероятностью $(1-P_1)$, функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_2 успешного перехода на работу от ЭУОМ.

В противном случае (если по каким-либо причинам переход на ЭУОМ не состоялся), с вероятностью $(1-P_2)$ функционирование элемента ЦС будет нарушено. В случае успешного перехода на работу от агрегата №2 возможен его переход в предотказное состояние за время $t_{по2}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в предотказное состояние агрегата №2, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_2 успешного перехода на работу от ЭУОМ.

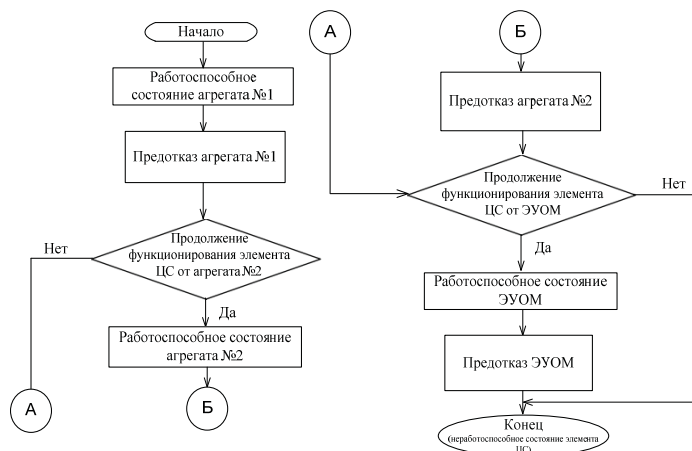


Рис. 3. Алгоритм перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС однолучевой схемы электропитания в проекции на структуру его СЭС

В противном случае (если по каким-либо причинам переход на ЭУОМ не состоялся), с вероятностью $(1-P_2)$ функционирование элемента ЦС будет нарушено. В случае успешного перехода на работу от ЭУОМ возможен дальнейший переход ЭУОМ в предотказное состояние за время $t_{по\ эуом}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. Переход ЭУОМ в предот-

казное состояние будет определять переход в состояние неработоспособности элемента ЦС.

Процесс перехода в состояние неработоспособности элемента ЦС однолучевой схемы электропитания на основе процедуры *GERT* представлен на рисунке 4.

При применении метода топологического преобразования стохастических сетей (ТПСС) сложный процесс перехода элемента ЦС в состояние неработоспособности декомпозируется на элементарные процессы, каждый из которых характеризуется функцией распределения и средним временем выполнения процесса [11].

Сущность метода заключается в том, что исследуется не система, а целевой процесс, который она реализует. Логика и порядок выполнения процессов обуславливается двухплюсной сетью, включающей входной, промежуточные и выходной узлы (вершины), при этом ребрам соответствует набор элементарных процессов, а вершинам (узлам) условия их выполнения.

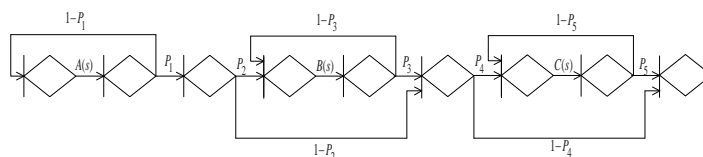


Рис. 4. Стохастическая сеть с процедурой *GERT*

Каждый узел осуществляет две функции – входную, устанавливающую условие выполнения узла и выходную, определяющую какие из операций, следующих за узлом будут выполняться. Входной узел сети выполняет только выходную функцию, а выходной только входную. Для каждого из ребер определяется функция передачи – условная характеристическая функция, являющаяся преобразованием Лапласа функции плотности вероятностей времени выполнения элементарного процесса [12].

Затем осуществляется топологическое преобразование стохастической сети по правилу Мэйсона. Поскольку входная и выходная вершины двухплюсной сети (графа) являются связными, то топологическое преобразование приводит к получению эквивалентной функции, сохраняющей в своей структуре параметры распределения и логику взаимодействия элементарных случайных процессов.

Получение эквивалентной функции позволяет известными методами [13] определить первые моменты случайного времени выполнения целевого процесса либо произвести ее обратное преобразование по Лапласу (определить ее оригинал в пространстве изображений Лапласа), результатом которого является функция плотности вероятностей времени выполнения исследуемого процесса.

Таким образом, суть метода ТПСС состоит в представлении рассматриваемого процесса в виде стохастической сети, замене множества элементарных ветвей сети одной эквивалентной и дальнейшим определением эквивалентной функции сети, начальных моментов и функции распределения случайного времени реализации анализируемого процесса [14-16].

В ходе моделирования приняты следующие ограничения и допущения: функции распределения случайных величин

относятся к классу экспоненциальных; вероятности, соответствующие ветвям стохастической сети, определяются статистическими методами; время осуществления отдельных операций анализируемого процесса имеет экспоненциальное распределение; предполагается отсутствие новых заявок до окончания обработки предыдущей; потоки заявок являются неконкурирующими.

Искомая условная функция распределения вероятности $W(t)$ случайного события, заключающегося в том, что время перехода элемента ЦС в состояние неработоспособности будет не больше определенного значения при условии, что все предшествующие события по переходу ЭА №1, ЭА №2, ЭУОМ в предотказное состояние, характеризующиеся временем их исполнения и события, идентифицируемые вероятностями их совершения выполнены и произошли соответственно, находится с использованием топологического уравнения Мейсона для замкнутых графов [17]. Замыкая стохастическую сеть фиктивной ветвью $Q(t)$, при условии, что эквивалентная функция $W(t)$ описывает исследуемый процесс, получаем, что топологическое уравнение Мейсона примет вид:

$$H = 1 - W(t)Q(t) = 0. \quad (1)$$

Затем для каждой ветви, взвешенной двумя параметрами: функцией распределения времени выполнения ветви и вероятностью ее выполнения, определим изображения функции распределения времени с помощью интегрального преобразования Лапласа.

К примеру, для времени перехода агрегата №1 в предотказное состояние плотность распределения вероятности имеет вид:

$$a(t) = \lambda_{n01} \exp(-\lambda_{n01}t), \quad (2)$$

а изображение будет равно

$$a(s) = \int_0^{\infty} \lambda_{n01} \exp(-\lambda_{n01}t) \exp(-st) dt = \frac{\lambda}{s + \lambda}.$$

Функция $a(s)$ аналогичная всюду, кроме точки $s = -\lambda$, которая является для нее простым полюсом. Теперь, зная изображения функций распределения времени выполнения всех ветвей, можно перейти к эквивалентной функции:

$$W(s) = a(s) p_a, \quad (4)$$

где p_a – вероятность выполнения ветви, при условии выполнения центра – истока для этой ветви. Для сети, представленной на рисунке 4, после определения эквивалентных функций петель первого и второго порядков, с учетом уравнения Мейсона:

$$H = 1 + \sum_{k=1}^k (-1)^k Q_k(s) = 0, \quad (5)$$

где k – порядок петель, входящих в стохастическую сеть и конкретных параметров распределения.

Для определения вероятностно-временных характеристик элемента ЦС необходимо от изображения эквивалентной функции стохастической сети перейти к ее оригиналу.

Согласно теореме обращения, в любой точке t непрерывной функции-оригинала $W(t)$ при известной функции – изображении $W(s)$ имеет место выражение:

$$W(t) = \frac{1}{2\pi i} \times \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} e^{st} W(s) ds, \quad (6)$$

где s – действительное число больше показателя роста S_0 . Безусловно, формула Римана-Меллина (11), в общем, решает задачу поиска оригинала по заданному изображению, однако, вызывает большие трудности, в частности, в ходе реализации модели с использованием пакета *Mathcad*. Это связано с необходимостью перехода от бесконечной области интегрирования к пределам, либо замены области замкнутым контуром L . К тому же в программной реализации модели в среде *Mathcad* оператор *invlaplace*, осуществляющий переход к оригиналу с использованием обратного преобразования Лапласа, при степени многочлена (10) больше 2 некорректно отображает функцию ввиду больших затрат вычислительных ресурсов. В связи с этим поиск функции распределения оригинала проводился с использованием теоремы разложения Хевисайда. Тогда возможно решить интеграл с использованием основной теоремы Коши о вычетах и перейти от интегрирования к вычислению суммы ряда:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} e^{st} W(s) ds = \frac{1}{2\pi i} \times \lim_{s \rightarrow \infty} \oint_L e^{st} W(s) ds = \sum_{k=1}^{\infty} \text{Re}_s [e^{st} W(s)], \quad (7)$$

где

$$\text{Re}_{s=s_k} [e^{st} W(s)] = \frac{W_1(s) e^{st}}{ds}. \quad (8)$$

$\text{Re}_{s=s_k} [e^{st} W(s)]$ обозначает вычет функции $e^{st} W(s)$ относительно особых точек, подставляемых в числитель $W_1(s)$ формулы (11) и первую производную многочлена $W_2(s)$, находящегося в знаменателе, а число особых точек – k .

Далее определяются корни полинома, находящегося в знаменателе эквивалентной функции $W(s)$. Поиск корней осуществлялся в пакете *Mathcad* с использованием оператора *solve*. Из-за громоздкости вычислений, представление результатов поиска корней полинома опущено. Искомый оригинал функции плотности распределения времени:

$$w(t) = \sum_{k=0}^2 \text{Re}_s [e^{st} W(s)] = \sum_{k=0}^2 e^{st} \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds}\right)}, \quad (9)$$

тогда функция распределения будет находиться выражением:

$$W(t) = \int_0^t w(t) dt = \sum_{k=0}^2 \left[1 - e^{st} \right] \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds}\right) (-s_k)}, \quad (10)$$

а среднее время перехода элемента ЦС в неработоспособное состояние будет определяться математическим ожиданием:

$$T = \int_0^{\infty} t W(t) dt = \sum_{k=0}^2 \frac{W_1(s)}{\left(\frac{dW_2(s)}{ds}\right) s_k^2}. \quad (11)$$

Показатели вероятности перехода элемента ЦС в неработоспособное состояние вследствие воздействия отказов его элементов СЭС позволяют определять значения вероятности сохранения работоспособности. Таким образом, предлагаемая модель обеспечивает расширение функциональных возможностей существующих решений с обеспечением моделирования этапов перехода в состояние неработоспособности элемента ЦС в условиях воздействия ДФ. При этом моделируются этапы прекращения возможности выработки электроэнергии элементом СЭС, что позволяет определять вероятность того, что элемент ЦС находится в работоспособном состоянии в условиях отказов элементов СЭС. Модель функционирования элементов центра связи одноканальной схемы электропитания в условиях отказов элементов СЭС позволяет получить исходные данные для блока № 3 модели функционирования ЦС в условиях отказов элементов СЭС.

Двухлучевая (двухканальная) схема электропитания элемента ЦС подразумевает собой питание группы аппаратных от независимых источников. При этом, в качестве резервного источника питания для одной группы применяется основной источник питания соседней группы, и наоборот. При этом процесс перехода в неработоспособное состояние такого элемента ЦС является более сложным. Алгоритм процесса в проекции на структуру его элементов СЭС представлен на рисунке 5.

Начальное состояние характеризуется работоспособностью агрегата №1 ЭПС №1. В процессе работы возможен его переход в предотказное состояние. Время, затрачиваемое на переход агрегата №1 ЭПС №1 в состояние предотказа (ПО) ($t_{по1}$) является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В результате перехода в предотказное состояние агрегата №1 ЭПС №1, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_1 успешного перехода на работу от агрегата №2 электропитающей станции (ЭПС) №1. В случае успешного перехода на работу от агрегата №2 ЭПС №1 возможен его переход в предотказное состояние за время $t_{по2}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в предотказное состояние агрегата №2 ЭПС №1, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_3 успешного перехода на работу от ЭУОМ ЭПС №1. В случае успешного перехода на работу от ЭУОМ ЭПС №1 возможен дальнейший переход ЭУОМ ЭПС №1 в состояние предотказа за время $t_{по\ эуом}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в состояние предотказа ЭУОМ ЭПС №1, функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_5 успешного перехода на работу от агрегата №1 ЭПС №2. В случае успешного перехода на работу от агрегата №1 ЭПС №2 возможен его переход в состояние предотказа за время $t_{по1}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в состояние предотказа агрегата №1 ЭПС №2, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_2 успешного перехода на работу от агрегата №2 ЭПС №2. В

случае успешного перехода на агрегат №2 ЭПС №2 возможен его переход в состояние предотказа за время $t_{по2}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в предотказное состояние агрегата №2 ЭПС №2, дальнейшее функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_4 успешного перехода на работу от ЭУОМ ЭПС №2. В случае успешного перехода на ЭУОМ ЭПС №2 возможен дальнейший переход ЭУОМ ЭПС №2 в состояние предотказа за время $t_{по\ эуом}$, которое является случайной величиной и распределено по экспоненциальному закону. В случае перехода в состояние предотказа ЭУОМ ЭПС №2, функционирование элемента ЦС прекращается.

В случае, если переход на агрегат №2 ЭПС №1 с вероятностью $(1-P_1)$ не состоялся, то функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_3 успешного перехода на ЭУОМ ЭПС №1.

В случае, если переход на ЭУОМ ЭПС №1 с вероятностью $(1-P_3)$ не состоялся, то функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_5 успешного перехода на агрегат №1 ЭПС №2.

В случае, если переход на агрегат №1 ЭПС №2 с вероятностью $(1-P_5)$ не состоялся, то функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_6 успешного перехода на агрегат №2 ЭПС №2.

В случае, если переход на агрегат №2 ЭПС №2 с вероятностью $(1-P_6)$ не состоялся, то функционирование элемента ЦС будет определяться вероятностью P_4 успешного перехода на ЭУОМ ЭПС №2.

В случае, если переход на ЭУОМ ЭПС №2 с вероятностью $(1-P_4)$ не состоялся, то функционирование элемента ЦС прекращается.

Представленный алгоритм является весьма сложным по своей структуре, и реализация стохастической сети в прямом виде представляется нетривиальной задачей, поскольку решение в таком виде потребует значительных вычислительных ресурсов, которыми не располагает исследователь. В связи с этим, предлагается преобразовать сеть к общему виду, представленному на рисунке 6. Преобразование заключается в том, что вершины 1-3 и 4, 5, 12 представляют собой стохастические сети, реализованные в блоке №1, то есть описывают процессы перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС для случаев, когда переход на агрегат №1 ЭПС №2 возможен. Вершины 6, 7, 8, 12 представляют собой стохастическую сеть процесса перехода в неработоспособное состояние ЭПС №2 для случая, когда переход на агрегат №1 ЭПС №2 невозможен. По сути, это является «сокращенной» версией стохастической сети блока №1 (без агрегата №1). Вершины 9, 10, 11, 12 представляют собой стохастическую сеть процесса перехода в неработоспособное состояние ЭПС №2 для случая, когда переход на агрегат №1 и агрегат №2 ЭПС №2 невозможен. Это также является упрощенным вариантом стохастической сети блока №1 (без агрегатов №1 и №2). Данный подход позволяет перейти от частных сетей к рассмотрению общей, что существенно экономит вычислительные и временные ресурсы.

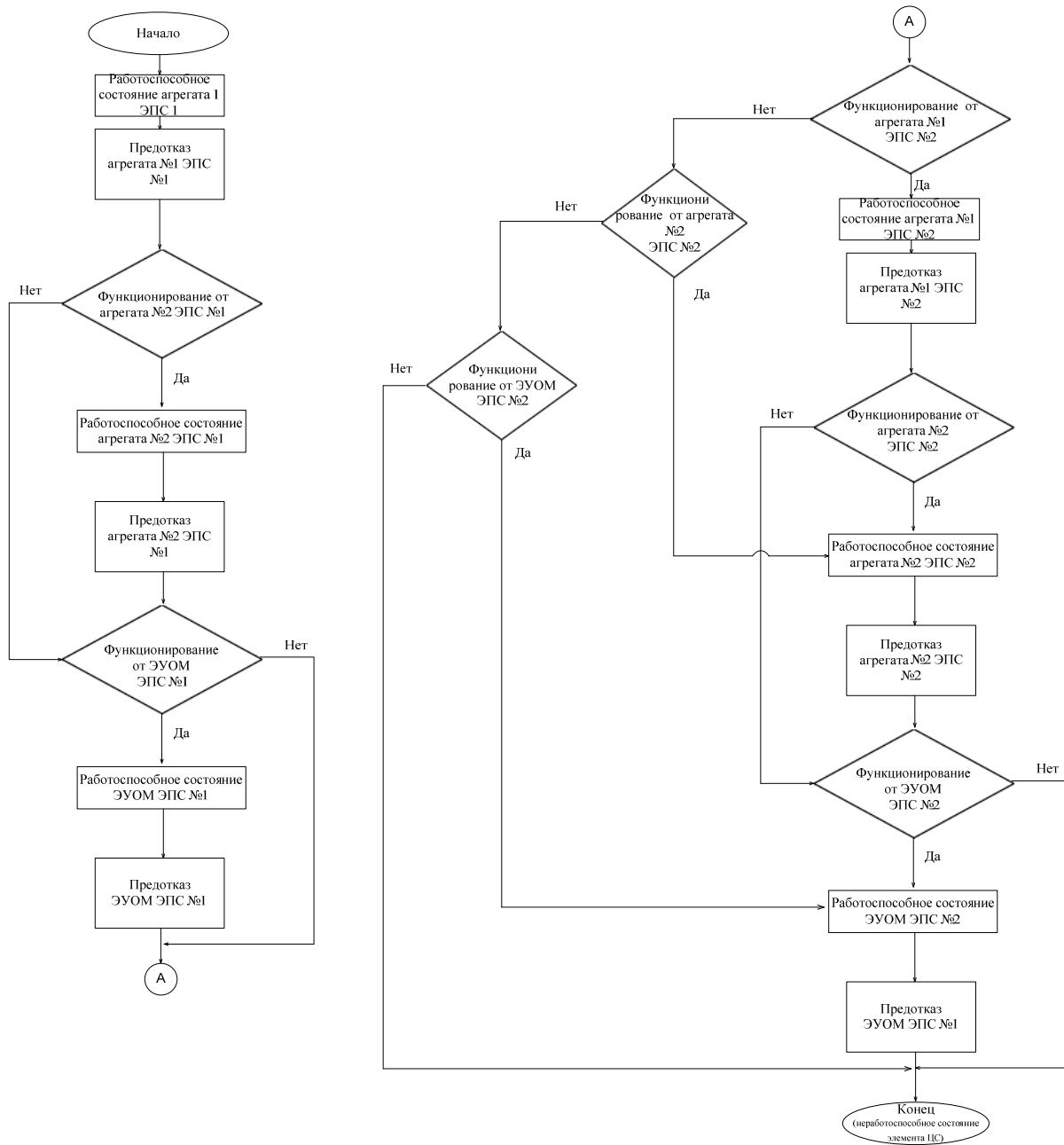


Рис. 5. Алгоритм перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания в проекции на структуру его элементов СЭС

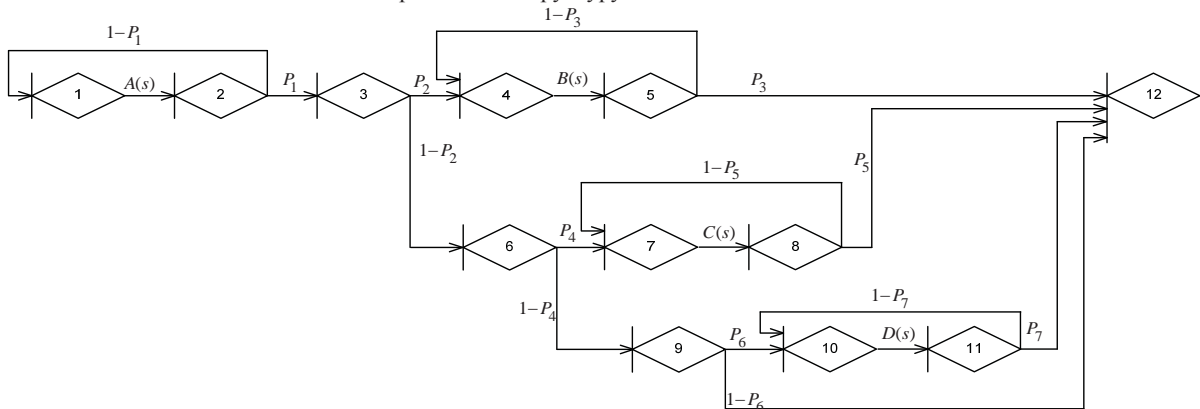


Рис. 6. Стохастическая сеть процесса перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания

На рисунке 6 представлена стохастическая сеть с процедурой *GERT*, описывающая процесс перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания. Необходимо определить функцию распределения $Q(t)$ и среднее время выполнения всех процессов, происходящих в стохастической сети. Опираясь на вышеизложенные способы применения математического аппарата исследования стохастических сетей с процедурой *GERT* аналогичным образом определяются вероятностно-временные характеристики процесса перехода элемента ЦС двухканальной схемы электропитания в неработоспособное состояние в условиях отказов элементов СЭС.

Переход элемента ЦС в неработоспособное состояние при отказах элементов СЭС неизбежно приводит к перерыву связи. Для восстановления нормального функционирования ЦС в работу вступает система управления центром связи (СУЦС), задача которой заключается в восстановлении нарушенной связи. В данном случае восстановление осуществляется за счет возобновления электропитания элемента центра путем перехода аппаратных этого элемента на работу от автономных источников электроэнергии (встраиваемых электроагрегатов или электроустановок отбора мощности от двигателя шасси), либо использованием электростанции холодного резерва, либо использованием источников других потребителей. Алгоритм процесса восстановления представлен на рисунке 7.

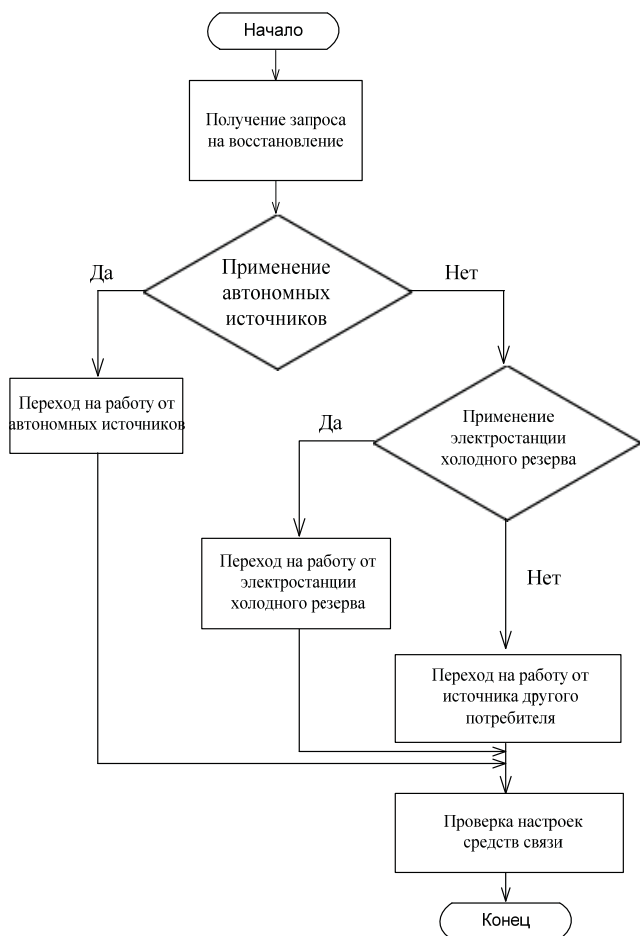


Рис. 7. Алгоритм процесса восстановления

При переходе элемента ЦС в неработоспособное состояние из-за отказов элементов СЭС, и, как следствие – нарушении связи, дежурный по ЦС получает запрос на восстановление с функцией распределения $A(t)$ за время $t_{пз}$ ($t_{пз}$ включает в себя время уведомления и время принятия решения). По результатам обработки запроса осуществляется переход на автономные источники с функцией распределения $B(t)$ за время $t_{пер.авист}$ ($t_{пер.авист}$ включает в себя время, затрачиваемое на подготовку автономного источника и прием нагрузки). После чего осуществляется проверка (восстановление) настроек аппаратуры (средств) связи с функцией распределения $D(t)$ за время $t_{провСрС}$.

Событие, при котором переход на работу от автономных источников осуществился, наступает с вероятностью P_1 . Событие, при котором переход на работу от автономных источников питания не состоялся, наступает с вероятностью $(1 - P_1)$, после чего осуществляется переход аппаратных на работу от электростанции холодного резерва с функцией распределения $C(t)$ за время $t_{пер.эвр}$ ($t_{пер.эвр}$ включает в себя время, затрачиваемое на подготовку резервной электростанции и прием нагрузки). После чего осуществляется проверка (восстановление) настроек аппаратуры (средств) связи с функцией распределения $E(t)$ за время $t_{провСрС}$. Событие, при котором переход на работу от электростанции холодного резерва может быть осуществлен наступает с вероятностью P_2 . Событие, при котором переход на работу от электростанции холодного не состоялся наступает с вероятностью $(1 - P_2)$, после чего осуществляется переход аппаратных на работу от источников питания другой аппаратной своей группы с функцией распределения $F(t)$ за время $t_{пер.др.апп}$ ($t_{пер.др.апп}$ включает в себя время, затрачиваемое на подготовку источника другой аппаратной и прием нагрузки). После чего осуществляется проверка (восстановление) настроек аппаратуры (средств) связи с функцией распределения $E(t)$ за время $t_{провСрС}$.

На рисунке 8 представлена стохастическая сеть с процедурой *GERT*, описывающая процесс восстановления связи.

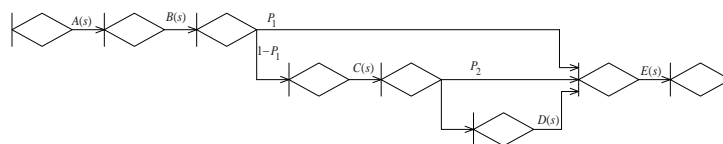


Рис. 8. Стохастическая сеть процесса восстановления

Необходимо определить функцию распределения $Q(t)$ и среднее время выполнения всех процессов, происходящих в стохастической сети. Согласно вышеизложенным способам применения математического аппарата исследования стохастических сетей с процедурой *GERT* определяются вероятностно-временные характеристики процесса восстановления нормального функционирования элемента ЦС при отказах СЭС (функции распределения времени восстановления с учетом вероятностей перехода на работу от автономных источников питания, электростанции холодного резерва и математическое ожидание времени восстановления).

Результаты, полученные в частных моделях, позволяют перейти к оценке показателей надежности функционирования ЦС и его элементов.

Коэффициент оперативной готовности i -го элемента ЦС определяется выражением:

$$K_{ог\ i} = K_{гi} P_{срi}(t), \quad (12)$$

где $P_{срi}$ – вероятность сохранения работоспособного состояния i -го элемента ЦС в условиях воздействия ДФ, полученная в блоке № 1 для элемента ЦС одноканальной схемы электропитания, в блоке № 1а – для элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания; $K_{гi}$ – коэффициент готовности i -го элемента ЦС:

$$K_{гi} = \frac{\bar{t}_{р/сп\ i}}{\bar{t}_{р/сп\ i} + \bar{t}_{в\ i}}, \quad (13)$$

где $\bar{t}_{р/сп\ i}$ – среднее время работоспособного состояния i -го элемента ЦС (среднее время до перехода элемента ЦС в состояние неработоспособности), полученное в блоке № 1 для элемента ЦС одноканальной схемы электропитания, в блоке № 1а – для элемента ЦС двухлучевой схемы электропитания; $\bar{t}_{в\ i}$ – среднее время восстановления связи при переходе элемента ЦС в состояние неработоспособности из-за отказов СЭС, полученное в ходе реализации блока № 2 модели.

Таким образом, «вкладывая» результаты частных моделей (блоки №1, №1а, №2) (рис. 1), в блок №3 становится возможным получить вероятностно-временные характеристики, описывающие способность элементов ЦС находится в работоспособном состоянии с учетом полученной функции сохранения работоспособности элементов в условиях воздействия отказов СЭС и среднего времени восстановления.

Полученные значения показателей надежности функционирования элементов ЦС позволяют перейти к оценке надежности функционирования самого центра связи, согласно схеме, представленной на рисунке 2.

В ходе оценки стоит учитывать, что элементам $x_1... x_3$ данной схемы соответствуют элементы ЦС двухлучевой схемы питания; $x_4... x_7$ – элементы ЦС одноканальной схемы питания.

Согласно положений теории надежности и теоремы умножения вероятностей, при последовательном соединении элементов в структурной схеме надежности коэффициент оперативной готовности всего такого участка равен произведению коэффициентов оперативной готовности элементов этого участка:

$$K_{ог} = \prod_{i=1}^n K_{ог\ i} \quad (14)$$

При параллельном соединении элементов в структурной схеме надежности оценивается коэффициент оперативной готовности этого участка:

$$K_{онг} = \prod_{i=1}^n K_{онг\ i}, \quad (15)$$

где $K_{онг\ i} = 1 - K_{ог\ i}$ – коэффициент оперативной готовности i -го элемента. Исходя из этого выражение для оценки коэф-

фициента оперативной готовности участка параллельно соединенных элементов примет вид:

$$K_{ог} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - K_{ог\ i}) \quad (16)$$

С учетом этого выражение для оценки надежности функционирования центра связи в условиях отказов элементов СЭС примет вид:

$$K_{ог\ с} = K_{ог\ 1} * K_{ог\ 2} * K_{ог\ 3} [1 - (1 - K_{ог\ 4})(1 - K_{ог\ 5})(1 - K_{ог\ 6})(1 - K_{ог\ 7})] \quad (17)$$

Таким образом, разработанная модель позволяет провести оценку вероятностно-временных характеристик процесса функционирования и показателя надежности $K_{ог}$ элементов ЦС в частности, и самого центра связи в целом.

Заключение

Использование комплексной модели дает возможность исследовать влияние отказов элементов СЭС и процессов восстановления на показатели функционирования ЦС, выражающиеся в функции распределения времени перехода в неработоспособное состояние элемента ЦС. Учет процессов, применяемых в ходе восстановления позволяет адекватно описывать процессы функционирования элементов ЦС в условиях отказов элементов СЭС и восстановления нарушенных связей (нормального функционирования элементов ЦС).

Определение вероятностно-временных характеристик функционирования ЦС, в условиях отказов элементов СЭС с учетом восстановления нарушенных связей (работоспособного состояния элементов ЦС) позволяет построить вектор дальнейшего исследования на предмет повышения надежности функционирования ЦС в целом.

Литература

1. Петров А.В. Модель функционирования сети документального обмена с учетом воздействия дестабилизирующих факторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 8. С. 79-86.
2. Войцеховский А.И. Методика оценки устойчивости функционирования сети связи // Информационные системы и технологии. 2016. № 1. С. 101-108.
3. Охтилев П. А., Бахмут А. Д., Крылов А. В., Охтилев М. Ю., Соколов Б. В. Подход к оцениванию структурных состояний сложных организационно-технических объектов на основе обобщенных вычислительных моделей // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 73-82.
4. Мальцев Г. Н., Якимов В. Л. Достоверность многоэтапного контроля технического состояния объектов испытаний // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1. С. 49-57.
5. Чебоксаров А. Н. Достоверность как критерий эффективности диагностирования транспортных и технологических машин // Вестник СибАДИ. 2016. № 5 (51). С. 89-94.
6. Абрамкин Р. В., Анисимов А. А., Бартош В. В., Винограденко А. М., Слепов С. Н. Вариант построения электростанции с адаптивным управлением по нагрузке // Материалы НПК «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях» СПб, 2019. С. 9-15.
7. Винограденко А.М., Заяц С.В., Кузнецов С.В. Перспективы развития полевых и стационарных средств технического обеспечения // Материалы III ВНК «Современные проблемы создания и эксплуатации ВВСТ», Санкт-Петербург: ВАС, Том 2. 2016. С. 157-161.

8. *Винограденко А.М.* Прогнозирование отказов контролируемых комплексов связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 222-237.
9. *Zhang, Y., Wang Y., Wu L.* Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: A Simulation Based on AnyLogic in System Engineering // Systems Engineering Procedia. 2018. Vol. 3. P. 249-258.
10. *Budko, P.A., Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M., Samoylenko V.V., Pedan A.V.* Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling // Distributed computer and communication networks: control, computation, communications Springer, Cham. 2019. Vol. 1141. Pp. 560-573.
11. *Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Samoylenko V.V., Zelensky E.G.* Development of a distributed multi-agent system monitoring and control networks of 0.4–35 kV // In: Proceedings of the 2017 IEEE Intern. Conf. on Control in Technical Systems (CTS) (2017). p 271–274.
12. *Волобуев М.Ф., Уфаев В.А.* Обнаружение постепенных отказов в резервированной измерительной системе в зависимости от полноты вероятностного описания выходных сигналов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2017. № 10. Т. 15. С. 28-35.
13. *Волобуев М.Ф., Мальцев А.М., Михайленко С.Б., Уфаев В.А.* Способ обнаружения отказов при экономичном резервировании бортового оборудования беспилотного летательного аппарата // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2016. № 9 (7). С. 1060-1067.
14. *Кузнецов С.В., Винограденко А.М.* Модель единой централизованной системы управления техническим состоянием вооружения военной и специальной техники // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 4. С. 48-54.
15. *Абрамов О.В.* Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3 (31). С. 5-14.
16. *Абрамов О.В.* Планирование профилактических коррекций параметров технических устройств и систем // Информатика и системы управления. 2017. № 3 (53). С. 55-66.
17. *Шевелев С.В., Семенов А.Б.* Системы мониторинга для систем экстренного оповещения населения // Вестник связи. 2021. № 3. С. 2-6.
18. *Будко П.А., Винограденко А.М., Меженев А.В., Чикирев А.А.* Способ и устройство интеллектуального экспресс-контроля технического состояния наземных средств связи и радиотехнического обеспечения полетов // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 235-283. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10108.
19. *Яшин А.И., Будко П.А., Винограденко А.М., Педан А.В.* Имитационное моделирование автоматизированной системы контроля технического состояния элементов распределенных радиодетей // Морская радиоэлектроника. 2018. № 1 (63). С. 32-37.

A GENERALIZED MODEL OF THE FUNCTIONING OF A FIELD COMMUNICATION NODE IN THE CONDITIONS OF FAILURES OF ELEMENTS OF THE POWER SUPPLY SYSTEM

ROMAN V. ABRAMKIN

St. Petersburg, Russia, avg62rus@rambler.ru

KEYWORDS: *functioning model, topological transformation of stochastic networks, reliability, communication node, element of the power supply system, destabilizing factors.*

ABSTRACT

Introduction: the functioning of a communication node under the influence of destabilizing factors is a complex process, the description of which is a non-trivial task. The random nature of the impact, as well as the importance of the power supply system, determine the need to create a model that allows adequately describing the process of functioning of both the node itself and its elements. **The purpose of the work** is to develop a model of the functioning of the communication node under the influence of internal destabilizing factors – failures of elements of the power supply system. **Methods used:** the use of the apparatus of topological transformation of stochastic networks with the probabilistic method of network planning (GERT) in the field of studying the functioning of the control system, taking into account the impact of failures of elements of the power supply system, allows us to adequately describe the functioning of both the elements (taking into account the specifics of the method of organizing power supply) and the communication node itself under the influence of destabilizing factors, expressed in its

functions of the distribution of recovery time and preservation of working condition. **The novelty of the work lies** in the fact that the peculiarities of the organization of the power supply of each element of the node are taken into account; destabilizing factors are failures of elements of the power supply system, as a result of which it is possible to disrupt or terminate the functioning of the node, which allows determining the probabilistic and temporal characteristics of the functioning of its elements under the influence of destabilizing factors; features and probabilistic-temporal characteristics of the process of restoring the functional state of the node elements, which includes a number of measures for the transition to autonomous sources, a cold reserve power plant, power sources for other consumers. **Result:** the presented model makes it possible to assess the reliability of the functioning of the communication node and its elements in the conditions of failures of the elements of the power supply system based on the available initial data. **Practical significance:** the presented model is universal and can be applied to any field communication node.

REFERENCES

1. Petrov A.V. The model of functioning of the network of documentary exchange taking into account the impact of destabilizing factors. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya Tula State University. Technical sciences.]. 2020. No. 8. pp. 79-86. (In Russian)
2. Vojcekhovskij A.I. Methodology for assessing the stability of the functioning of the communication network. *Informacionnye sistemy i tekhnologii* [Information systems and technologies]. 2016. No. 1. pp. 101-108. (In Russian)
3. Ohtilev P. A., Bahmut A. D., Krylov A. V., Ohtilev M. Yu., Sokolov B. V. Approach to the estimation of structural States of complex organizational and technical objects based on generalized computational models. *H&ES Reserch*. 2017. T. 9. № 5. S. 73-82. 2017. Vol. 9. No. 5. Pp. 73-82. (In Russian)
4. Mal'cev G. N., Yakimov V. L. Reliability of multi-stage control of the technical condition of test objects. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. 2018. No. 1. Pp. 49-57. (In Russian)
5. Cheboksarov A. N. Reliability as a criterion for the effectiveness of diagnostics of transport and technological machines. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2016. No. 5 (51). Pp. 89-94. (In Russian)
6. Abramkin R. V., Anisimov A. A., Bartosh V. V., Vinogradenko A. M., Slepov S. N. Option for building a power plant with adaptive load control. *Materialy NPK "Problemy tekhnicheskogo obespecheniya vojsk v sovremennyh usloviyah"* [Materials of the NPC "Problems of technical support of troops in modern conditions"] St. Petersburg, 2019. Pp. 9-15. (In Russian).
7. Vinogradenko A.M., Zayac S.V., Kuznecov S.V. Prospects for the development of field and stationary technical support facilities. *Materialy III VNPk "Sovremennye problemy sozdaniya i ekspluatsii VVST"* [Materials of the III VNPk "Modern problems of creation and operation of vvst"]. Saint Petersburg, 2019, P. 15-18. (In Russian)
8. Vinogradenko A.M. Forecasting failures of controlled communication complexes for special purposes. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control systems, communications and security]. 2020. No 3. p. 222-237. (In Russian)
9. Zhang, Y., Wang Y., Wu L. Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: A Simulation Based on AnyLogic in System Engineering. *Systems Engineering Procedia*. 2018. Vol. 3. P. 249-258.
10. Budko, P.A., Fedorenko V.V., Vinogradenko A.M., Samoylenko V.V., Pedan A.V. Approach to the intellectual monitoring of the technical condition of difficult dynamic objects on the basis of the systems of a polling. *Distributed computer and communication networks: control, computation, communications Springer*, Cham. 2019. Vol. 1141. Pp. 560-573.
11. Fedorenko V.V., Kononov Y.G., Samoylenko V.V., Zelensky E.G. Development of a distributed multi-agent system monitoring and control networks of 0.4-35 kV. Proceedings of the 2017 IEEE Intern. Conf. on Control in Technical Systems (CTS) (2017). p 271-274.
12. Volobuev M.F., Ufaev V.A. Detection of gradual failures in a redundant measurement system depending on the completeness of the probabilistic description of output signals. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems]. 2017. No 10. F. 15. p. 28-35. (In Russian)
13. Volobuev M.F., Mal'cev A.M., Mihajlenko S.B., Ufaev V.A. Method for detecting failures in the economical reservation of onboard equipment of an unmanned aerial vehicle. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Equipment and technologies]. 2016. No 9 (7). p. 1060-1067. (In Russian)
14. Vinogradenko A. M., Kuznecov S. V. The model of a single centralized automated system for controlling technical condition of armament and military equipment. *H&ES Reserch*. 2018. Vol. 10. No. 4. Pp. 48-54. DOI:10.24411/2409-5419-2018-10096. (In Russian)
15. Abramov O.V. Predicting the state and planning the operation of critical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2020. No. 3 (31). Pp. 5-14. (In Russian)
16. Abramov O.V. Planning of preventive corrections of parameters of technical devices and systems. *Informatika i sistemy upravleniya* [Computer science and control systems] 2017. No. 3 (53). Pp. 55-66. (In Russian)
17. Shevelev S. V., Semenov A. B. Monitoring systems for emergency public warning systems. *Vestnik svyazi* [Vestnik svyazy] 2021. No. 3. Pp. 2-6. (In Russian)
18. Budko P. A., Vinogradenko A. M., Mezhenov A. V., Chikirev A. A. Method and device for intelligent express control of the technical condition of ground communication facilities and radio technical support of flights. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security] 2020. No. 1. Pp. 235-283. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10108. (In Russian)
19. Yashin A.I., Budko P.A., Vinogradenko A.M., Pedan A.V. Simulation modeling of an automated system for monitoring the technical condition of elements of distributed radio centers. *Morskaya radioelektronika* [Marine Radioelectronics] 2018. No. 1 (63). pp. 32-37. (In Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHOR:

Abramkin R.V. postgraduate student of the S. M. Budyonny Military Academy of Communications

For citation: Abramkin R.V. A generalized model of the functioning of a field communication node in the conditions of failures of elements of the power supply system // H&ES Reserch. 2021. Vol. 13. No. No 6. P. 4-15. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-4-15 (In Rus)

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ АДАПТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ И ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

ЛИБЕРОВСКИЙ

Никита Юрьевич¹

ПРИПУТИН

Владимир Сергеевич²

ЧИРОВ

Денис Сергеевич³

АННОТАЦИЯ

Введение: Разработка алгоритмов адаптивного формирования диаграммы направленности антенн активно ведется последние десятилетия различными научно-исследовательскими коллективами как у нас в стране, так и за рубежом. Актуальность и востребованность подобных работ обусловлено требованиями повышения эффективности приема полезного сигнала, особенно в системах мобильной связи. Адаптивное формирование диаграммы направленности является ключевой разработкой для современных беспроводных систем связи, в частности 5G. Повышающиеся требования, накладывающие ограничение на спектральную полосу сигнала и его центральную частоту при ограниченной мощности сигнала приводят к стратегии формирования узкого луча передачи сигнала, повышая тем самым энергетическую эффективность передачи сигнала и снижая накладные расходы, связанные с приемом различных помех. В настоящей статье представлен обзор исследований, посвященных этой тематике.

Приведены результаты анализа работ, посвященных совершенствованию классического алгоритма минимизации среднеквадратичной ошибки, слепого разделения сигналов, алгоритмов селекции антенн в системах из нескольких антенн и другие темы адаптивной обработки сигналов. **Обсуждение:** Показано, что основные направления исследований сосредоточены на усовершенствовании классических алгоритмов диаграммообразования, а также на усовершенствовании методов приема цифровых сигналов в системах MIMO. Также были рассмотрены алгоритмы распознавания типа модуляции сигналов, алгоритм слепого разделения сигналов второго порядка, усовершенствованный алгоритм автоматического контроля усиления, алгоритм подавления шумоподобных помех и алгоритм оценки параметров диаграммы направленности.

Сведения об авторах:

¹младший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, liberovsky.nikita@mail.ru

²к.т.н., заведующий лабораторией, научно-исследовательский отдел Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, v-priputin@yandex.ru

³д.т.н., доцент, заведующий кафедрой, кафедра "Радиотехнические системы" Московского технического университета связи и информатики, г. Москва, Россия, d.s.chiroy@mtuci.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая обработка сигналов; адаптивное формирование диаграммы направленности; слепое разделение сигналов; минимизация среднеквадратичной ошибки; распознавание типа сигнала

Для цитирования: Либеровский Н.Ю., Припутин В.С., Чиров Д.С. Обзор исследований адаптивного формирования диаграммы направленности и цифровой обработки сигналов // Научно-исследовательские технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 16–21. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-16-21

Введение

Адаптивное формирование диаграммы направленности является ключевой разработкой для современных беспроводных систем связи [1-5], в частности 5G. Повышающиеся требования, накладывающие ограничение на спектральную полосу сигнала и его центральную частоту при ограниченной мощности сигнала приводят к стратегии формирования узкого луча передачи сигнала, повышая тем самым энергетическую эффективность передачи сигнала и снижая накладные расходы, связанные с приемом различных помех.

В данной работе приведен обзор научных исследований, касающихся различных аспектов адаптивной обработки сигналов и повышения эффективности приема полезного сигнала.

Обзор основных публикаций по теме исследования

В работе [6] предложен алгоритм оценки параметров диаграммы направленности антенной решетки в системах радиолокации с электрическим сканированием. В частности алгоритм позволяет оценить коэффициент направленного действия, ширину луча и уровень боковых лепестков диаграммы направленности антенной решетки.

Суть алгоритма состоит в использовании аналитической функции диаграммы направленности антенной решетки в зависимости от комплексных весовых коэффициентов в декартовой системе координат антенны. Функция диаграммы направленности рассматривается на конечном множестве направлений, представленных в виде нескольких азимутальных сечений с конечным количеством азимутов в каждом сечении.

Оценка максимума диаграммы направленности осуществляется посредством сравнения значений модуля диаграммы направленности в окрестности главного луча. Оценка коэффициента направленного действия осуществляется с использованием аналитического выражения, в котором учтена дискретность сетки наблюдения посредством аппроксимации операции интегрирования на дискретном множестве значений.

Оценка ширины главного луча на уровне -3 дБ осуществляется путем нахождения двух смежных направлений, между которыми находится искомая мощность. Точные границы главного луча определяются линейной аппроксимацией между такими направлениями. Для определения уровня боковых лепестков на каждом азимутальном сечении предложен итеративный алгоритм, не требующий поиска интервала главного луча и не приводит к некорректным результатам в условиях отсутствия боковых лепестков или их несимметричного расположения. Также было проведено численное моделирование предложенного алгоритма, подтверждающее его работоспособность.

В работе [7] исследуется эффективность работы алгоритма минимизации квадратичной ошибки (Least Mean Square, LMS) в задаче адаптивного формирования диаграммы направленности при изменении значения шага градиентного спуска, отношения сигнал-помеха и отношения сигнал-шум. Варьируя шаг градиентного спуска в пределах от нуля,

до максимального значения, равного отношению двойки к следу ковариационной матрицы, было показано, что оптимальный размер шага лежит в диапазоне от 25 до 50% от максимального шага. В этом диапазоне алгоритму требуется меньшее число итераций для минимизации квадратичной ошибки.

При изменении отношения сигнал-помеха был сделан вывод, что в случае, когда мощность помехи меньше мощности полезного сигнала, алгоритм требует больше итераций. Также было показано, что алгоритм минимизации квадратичной ошибки сходится достаточно быстро, если отношение сигнал-шум больше 25 дБ.

В работе [8] проводится сравнительное исследование основных алгоритмов адаптивного формирования диаграммы направленности: минимизации квадратичной ошибки (Least Mean Square, LMS), нормализованной минимизации квадратичной ошибки (Normalized Least Mean Square, NLMS), рекурсивной минимизации квадратичной ошибки (Recursive Least Square, RLS), обращение матрицы отсчетов (Sample Matrix Inversion, SMI), комбинированный LMS с первой итерацией SMI (LMS/SMI) и комбинированный NLMS с переменным смешивающим параметром (Combined NLMS, CNLMS).

Было проведено численное моделирование, включающее в себя два типа экспериментов: первый эксперимент моделировал диаграмму направленности антенной решетки при использовании различных адаптивных методов; второй эксперимент исследовал сходимость квадратичной ошибки.

Было показано, что диаграммы направленности методов RLS, SMI и LMS/SMI имеют больший уровень боковых лепестков, в отличие от LMS, NLMS и CNLMS. Однако LMS показал большую производительность при большом числе антенных элементов.

Второй эксперимент показал, что SMI, RLS и LMS/SMI сходятся быстрее по сравнению с LMS, NLMS и CNLMS. По сравнению с классическими алгоритмами LMS и NLMS, их оптимизированные варианты LMS/SMI и CNLMS показали лучшую сходимость.

В работе [9] предложен метод слепого разделения сигналов, основанный на сдвиговых статистиках второго порядка. Алгоритм логически разбит на четыре этапа. На первом этапе из полученных входных отсчетов формируются сдвиговые статистики с различным временным сдвигом. Далее на втором этапе проводится процедура одновременной диагонализации статистик. Исходя из используемых предположений о независимости передаваемых сигналов считается, что существует такой нетривиальный набор весовых коэффициентов, который позволяет одновременно диагонализировать рассчитанные статистики. Эти коэффициенты и являются элементами размешивающей матрицы, получаемой на третьем этапе. На четвертом этапе рассчитываются выходные сигналы алгоритма путем умножения размешивающей матрицы на матрицу входных сигналов.

Было проведено численное моделирование предложенного алгоритма с трехэлементной линейной эквидистантной антенной решеткой, а также триортогональной антенной решеткой для оценки поляризационных характеристик сигналов. Моделирование показало, что в случае с простран-

венной селекцией предложенный метод дает выигрыш в отношении сигнал-помеха не менее 20 дБ. В случае с поляризационной селекцией чувствительность слепого метода разделения сигналов зависит от формы поляризации падающих сигналов и наиболее эффективен случай с одинаковой формой эллипса поляризации сигналов, но противоположным направлением вращения вектора напряженности электромагнитного поля.

В работе [10] рассматривается нелинейный алгоритм оценки искажений многопозиционного сигнала с квадратурно-амплитудной модуляцией в системах ММО. Алгоритм основан на методе наименьших квадратов с использованием ограничений регуляризации Тихонова. Предполагается, что характеристики канала квазистационарны, релеевское замирание некоррелировано и нет информации о вероятностных законах распределения шумов.

Было проведено сравнение предложенного нелинейного алгоритма с линейным алгоритмом оценки, основанным на полиномиальной аппроксимации элементов матрицы канала. Результаты моделирования показали, что малых значениях отстройки частоты точность оценки нелинейного алгоритма сопоставима с линейным, но при этом вычислительная сложность линейного алгоритма ниже. Однако при больших значениях отстройки нелинейный алгоритм превосходит по точности оценки и в помехоустойчивости его линейный аналог.

В работе [11] три адаптивных алгоритма формирования диаграммы направленности антенной решетки, не требующих априорной информации о направлении прихода полезного сигнала. Однако требуется знание о корреляции полезного сигнала с входным сигналом.

Первый алгоритм использует классический LMS, но на каждой итерации фиксируются модули весовых коэффициентов в соответствии с заранее определенным вектором. Второй алгоритм также нормирует весовые коэффициенты, но нормированные коэффициенты используются только для формирования выходного сигнала, а в алгоритме LMS используются ненормированный вектор, в отличие от первого алгоритма. Третий алгоритм использует в качестве оценочной функции сумму из двух выражений. Первое выражение представляет собой классическую среднеквадратичную ошибку сигнала, а второе выражение обозначает ошибку от формы диаграммы направленности. Было проведено численное моделирование, в ходе которого было показано, что предложенные алгоритмы сходятся быстрее алгоритма подавления боковых лепестков (Generalized side-lobe canceller, GSC).

В работе [12] предлагается метод автоматического цифрового контроля усиления (Digital Automatic Gain Control, DAGC) для приема сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией. Были показаны две блок-схемы DAGC: для грубой и точной настройки. Их отличие состоит в том, что при грубой настройке значение множителя входного сигнала обратно пропорционально значению образцового сигнала, а при точной настройке - прямо пропорционально. Было проведено моделирование работы предложенного метода DAG для 16-QAM, 64-QAM и 256-QAM полезного сигнала в присутствии помехи различной мощности.

Результаты моделирования показали, что предложенный метод автоматической регулировки усиления не зависит от позиционности QAM сигнала, уровня мощности помех и их количества. В среднем применение метода в среднем уменьшает уровень битовой ошибки в три раза.

В работе [13] сравнивается работа LMS и NLMS алгоритмов. Проведено моделирование в среде Matlab, в котором рассматривалась скорость сходимости алгоритмов для линейной равномерной антенной решетки из 16 элементов. Результаты показали, что NLMS сходится быстрее классического LMS алгоритма.

В работе [14] рассматриваются существующие методы распознавания основных видов межимпульсной модуляции: постоянная, разнородная, скользящая, разнородно-постоянная, случайная и периодическая. Анализируются следующие методы распознавания: с использованием искусственных нейронных сетей, с использованием вейвлет-преобразований и с использованием гистограмм.

Метод распознавания с использованием искусственных нейронных сетей использует несколько численных признаков, вычисляемых на основе входных данных. Данные признаки позволяют распознавать четыре вида модуляции: скользящую, периодическую, случайную и разнородно-постоянную. Затем сравнивая эти признаки с пороговыми значениями принимается решение относительно модуляции входного сигнала. Для определения пороговых значений используются различные типы нейронных сетей, обеспечивающих вероятность корректного распознавания близкую к 100%.

Суть метода распознавания с использованием вейвлет-преобразований состоит в том, что локальные экстремумы вейвлет-коэффициентов сигналов со случайной модуляцией имеют более низкие значения относительно разнородной модуляции. Таким образом вычисляются два признака, основанные на вычислении вейвлет-коэффициентов. На первом этапе осуществляется отделение сигналов со случайной и разнородной модуляциями от других типов сигналов, а для отделения случайно и разнородной модуляций между собой используется метод опорных векторов. Для разделения других типов модуляций используется признак, основанный на свойствах коэффициента эксцесса. Были проведены исследования, показывающие, что при уровне декомпозиции вейвлет-разложения, равному 3, случайная и разнородная модуляции распознаются с вероятностью около 95%. Однако вероятность распознавания уменьшается при увеличении пропущенных импульсов. Распознавание других типов модуляции составила 83%.

Метод распознавания с использованием гистограмм рассчитывает статистики, основанные на гистограммах разностей первого и более высоких порядков. Для классификации типов модуляции вначале используется трехслойный перспертрон, разделяющий сигналы на три подкласса по два типа модуляции, в каждом из которых в дальнейшем классификатор ядерного сглаживания принимает решение относительно распознанного типа модуляции.

В работе [15] предлагаются усовершенствованные варианты LMS алгоритма, а также проводится их сравнение. Первый алгоритм представляет собой совмещенный алго-



ритм LMS и алгоритм компенсации с решающей обратной связью (Decision feedback equalizer based least mean square, DFELMS), дополнительно фильтрующий сигнал от межсимвольной интерференции. Второй алгоритм переиспользует входные данные входного сигнала с целью повышения скорости сходимости (Data reusing least mean square, DRLMS). Также было проведено численное моделирование предложенных и классического алгоритмов, по результатам которого было показано, что DFELMS и DRLMS сходятся быстрее LMS. В то же время DRLMS формирует диаграмму направленности с большим усилением в сторону направления прихода сигналов.

В работе [16] предлагается метод выбора подмножества приемной антенны в условиях нестационарного канала MIMO. Представлена модель приемной MIMO антенны с раздельным мультиплексированием, а также показан алгоритм выбора подмножества антенных элементов за константное время, не выходящее за пределы требования стандарта LTE. Также было проведено численное моделирование, по результатам которого был выявлен выигрыш в ОСП принимаемого сигнала в 1 дБ.

В работе [17] предлагается дополнить модель MIMO с выбором антенн додетекторным комбинированием. Показана аппаратная схема модели, состоящей из набора ступеней комбинирования, коммутирующая с одной или двумя приемными антеннами. Коммутация либо передает на вход АЦП либо сигнал с одной антенны, либо сумму сигналов с двух антенн, при этом один сигнал может дополнительно проходить через фазовращатель. Также предложена программная реализация поиска оптимального подмножества антенн с использованием критерия максимума взаимной информации. В целях снижения вычислительной сложности алгоритма представлен субоптимальный алгоритм пошагового поиска. Было проведено программное моделирование, показавшее выигрыш предложенного алгоритма в 1,5 дБ.

В работе [18] предложен метод, решающий принципиальную проблему предсказания канальной матрицы MIMO системы и выбора антенн в условиях движущейся линейной антенной решетки. Метод работает при выполнении двух предположений. Первое предположение состоит в том, что антенная решетка движется вдоль вектора, соединяющего центры антенных элементов, с постоянной скоростью. Второе предположение состоит в том, что показатели электромагнитного поля зависят только от точки наблюдения. Таким образом, если две антенны в разные моменты времени находились в одной точке, то измерение электромагнитного поля в эти моменты времени от этих элементов будут одинаковыми с точностью до фазы. Было проведено численное моделирование приема сигнала с использованием предложенного алгоритма и без него. По результатам моделирования было показано, что использование предложенного алгоритма привело к энергетическому выигрышу в 2 дБ.

В работе [19] предложен метод подавления подобных помех в задаче приема широкополосного сигнала. Под подобной помехой понимается помеха, занимающая полосу частот и имеющая структурное сходство с полезным сигналом, но основана на других функциях расширения спектра. Суть метода состоит в представлении подобной помехи в

виде детерминированной цепи Маркова с двумя состояниями, зависящими от нескольких предыдущих символов. Были проведены численное моделирование зависимости вероятности распознавания комбинаций символов помехи при различных значениях ширины спектра флуктуаций амплитуды и задержек. Результаты показали, что эффективность метода увеличивается при уменьшении ширины спектра флуктуаций параметров помехи, а также при увеличении мощности помехи.

В работе [20] исследуется работа адаптивного алгоритма Кейпона при наличии нескольких помех. Проведен спектральный анализ разрешающей функции Кейпона. Показаны ситуации, при которых разрешающая функция не распознает помеху при определенных координатах прихода сигнала.

Заключение

В ходе данного исследования проведен анализ существующих работ в области адаптивного формирования диаграммы направленности антенн. Показано, что основные направления исследований сосредоточены на усовершенствовании классических алгоритмов диаграммообразования, а также на усовершенствовании методов приема цифровых сигналов в системах MIMO. Также были рассмотрены алгоритмы распознавания типа модуляции сигналов, алгоритм слепого разделения сигналов второго порядка, усовершенствованный алгоритм автоматического контроля усиления, алгоритм подавления шумоподобных помех и алгоритм оценки параметров диаграммы направленности. В итоге, можно утверждать, что современным трендом в области адаптивного формирования диаграммы направленности антенн является применение алгоритмов, основанных на технологиях искусственного интеллекта.

Литература

1. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143830.
2. Van Veen B. D., Buckley K. M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering // IEEE ASSP Magazine, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, April 1988, doi: 10.1109/53.665
3. Godara L. C. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations // Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997, doi: 10.1109/5.622504
4. Griffiths L., Jim C. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 30, no. 1, pp. 27-34, January 1982, doi: 10.1109/TAP.1982.1142739
5. Cox H., Zeskind R., Owen M. Robust adaptive beamforming // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 35, no. 10, pp. 1365-1376, October 1987, doi: 10.1109/TASSP.1987.1165054
6. Шацкий Н.В. Алгоритм оценки характеристик направленности антенной решетки с электрическим сканированием в системе координат наблюдения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 4-10.
7. Anjaneyulu P., Rao P.V.D.S, Sunehra D. Effect of Various Parameters on Minimum Mean Square Error and Adaptive Antenna

Beamforming using LMS Algorithm // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418179

8. *Abualhayja'a M., Hussein M.* Comparative Study of Adaptive Beamforming Algorithms for Smart antenna Applications // 2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSIPA), 2021, 1-5, doi: 10.1109/ICCSIPA49915.2021.9385725

9. *Припутин В.С.* Метод слепого разделения сигналов на базе статистик второго порядка в задаче пространственнополяризационной селекции // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Том 8. №6. С. 36-39.

10. *Поборчая Н.Е., Пестряков А.В.* Синтез и анализ алгоритмов оценки искажений сигнала в системе с ММО в условиях априорной неопределенности // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №10. С. 13-20.

11. *Miller S. R., Spanias A.* Adaptive Antenna Beamforming Using Quiescent Pattern Control // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 651-654, 2007, doi: 10.1109/LAWP.2007.913327.

12. *Prasolov A.A.* Digital agc reference level correction in a wide-band quadrature amplitude modulated radio receiver // Т-Comm 2019, vol. 13, no.7, pp. 54-59.

13. *Jeripotula P. R., Naik B. Rajendra* Performance Analysis of Adaptive Beamforming Algorithms // 2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCSDET.2018.8821132.

14. *Чиров Д.С., Кандаурова Е.О.* Анализ методов распознавания видов межимпульсной модуляции сигналов радиолокационных средств // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Том 13. №3. С. 15-23.

15. *Rathore A., Panda D. K.* DRLMS, DFELMS, LMS adaptive beamforming algorithms for smart antenna system // 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOMICON.2017.8279057.

16. *Starovoytov M.Yu.* The study of performance limits of receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing in non-stationary channel // Т-Comm. 2017, vol. 11, no.8, pp. 63-68.

17. *Крейнделин В.Б., Старовойтов М.Ю.* Повышение помехоустойчивости системы связи ММО с пространственным мультиплексированием методом додетекторного сложения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №4. С. 4-13.

18. *Starovoytov M.Yu.* MIMO channel prediction and receive antenna selection for the moving linear array. Т-Comm. 2017, vol. 11, no.2, pp. 56-62.

19. *Петров Е.П., Алешкин Е.А.* Метод подавления подобных помех с неизвестной амплитудой и задержкой сигнала в системах связи с шумоподобными сигналами // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №11. С. 34-39.

20. *Егоров В.А., Кондыбаев Н.С., Сапрыкин А.А.* Использование метода кейпона для нахождения координат источников излучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Том 10. №5. С. 3-7.

A REVIEW OF RESEARCH ON ADAPTIVE BEAMFORMING AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING

NIKITA Y. LIBEROVSKIY

Moscow, Russia, liberovsky.nikita@mail.ru

VLADIMIR S. PRIPUTIN

Moscow, Russia, v.priputin@yandex.ru

DENIS S. CHIROV

Moscow, Russia, chirov@srd.mtuci.ru

ABSTRACT

Introduction: Recently, there has been an active development of algorithms for adaptive beamforming. Such work is required in order to improve the efficiency of receiving a useful signal, especially in mobile communication systems. This article provides an overview of research on this topic. Papers devoted to the improvement of the classical least mean square algorithm, blind signal separation methods, antenna selection algorithms in MIMO systems and other topics of adaptive signal processing are presented. **Practical relevance:** Adaptive beamforming is a key development for modern wireless communication systems, in particular 5G. Increasing requirements that impose a limitation on the spectral bandwidth of the signal and its center frequency with limited signal power lead to the strategy of forming a narrow signal transmission beam, thereby increasing the energy efficiency of signal transmission and reducing the overhead

KEYWORDS: digital signal processing; adaptive beamforming; blind source separation; least mean square; signal identification

associated with the reception of various interference. This article provides an overview of studies on this topic. **The results** of the analysis of works devoted to the improvement of the classical algorithm for minimizing the mean square error, blind signal separation, antenna selection algorithms in systems of several antennas, and other topics of adaptive signal processing are presented. Discussion: It is shown that the main directions of research are focused on the improvement of classical diagramming algorithms, as well as on the improvement of methods for receiving digital signals in MIMO systems. Algorithms for recognizing the type of signal modulation, an algorithm for blind separation of second-order signals, an improved algorithm for automatic gain control, an algorithm for suppressing noise-like interference, and an algorithm for estimating radiation pattern parameters were also considered.

REFERENCES

1. Schmidt R. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986, doi: 10.1109/TAP.1986.1143830.
2. Van Veen B. D., Buckley K. M. (1988). Beamforming: a versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, no. 2, pp. 4-24, April 1988, doi: 10.1109/53.665.
3. Godara L. C. (1997). Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations. *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997, doi: 10.1109/5.622504.
4. Griffiths L., Jim C. (1982). An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 1, pp. 27-34, January 1982, doi: 10.1109/TAP.1982.1142739.
5. Cox H., Zeskind R., Owen M. (1987). Robust adaptive beamforming. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 35, no. 10, pp. 1365-1376, October 1987, doi: 10.1109/TASSP.1987.1165054.
6. Shatskiy N.V. (2021). Algorithm for evaluating the directional characteristics of an antenna array with electric scanning in the observation coordinate system. *T-Comm*, vol. 15, no.10, pp. 4-10. (in Russian)
7. Anjaneyulu P., Rao P.V.D.S, Sunehra D. (2021). Effect of Various Parameters on Minimum Mean Square Error and Adaptive Antenna Beamforming using LMS Algorithm. *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418179.
8. Abualhayja'a M., Hussein M. (2021). Comparative Study of Adaptive Beamforming Algorithms for Smart antenna Applications. *2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCSPA49915.2021.9385725.
9. Priputin V.S. (2014). Blind signal separation based on second order statistics for spatially polarization signal processing. *T-Comm*, vol. 8, no.6, pp. 36-39.
10. Poborchaya N.E., Pestryakov A.V. (2019). Synthesis and analysis of the signal distortion estimation algorithm for the MIMO systems under the conditions of prior uncertainty. *T-Comm*, vol. 13, no.10, pp. 13-20. (in Russian)
11. Miller S. R., Spanias A. (2007). Adaptive Antenna Beamforming Using Quiescent Pattern Control. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 651-654, doi: 10.1109/LAWP.2007.913327.
12. Prasolov A.A. (2019). Digital agc reference level correction in a wideband quadrature amplitude modulated radio receiver. *T-Comm*, vol. 13, no.7, pp. 54-59.
13. Jeripotula P. R., Naik B. (2018). Performance Analysis of Adaptive Beamforming Algorithms. *2018 International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)*, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCSDET.2018.8821132.
14. Chirov D.S., Kandaurova E.O. (2019). Analysis of methods for recognition of types of pulse repetition interval modulation of radar signals. *T-Comm*, vol. 13, no.3, pp. 15-23. (in Russian)
15. Rathore A., Panda D. K. (2017). DRLMS, DFELMS, LMS adaptive beamforming algorithms for smart antenna system. *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOMICON.2017.8279057.
16. Starovoytov M.Yu. (2017). The study of performance limits of receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing in non-stationary channel. *T-Comm*, vol. 11, no.8, pp. 63-68.
17. Kreindelin V.B., Starovoytov M.Yu. (2017). Application of pre-detector receive signal combining to improve the performance of MIMO spatial multiplexing. *T-Comm*, vol. 11, no.4, pp. 4-13. (in Russian)
18. Starovoytov M.Yu. (2017). MIMO channel prediction and receive antenna selection for the moving linear array. *T-Comm*, vol. 11, no.2, pp. 56-62.
19. Petrov E.P., Aleshkin E.A. (2016). Method of suppression of signal-similar interference with unknown amplitude and time delay in communication systems with noise-shaped signals. *T-Comm*. Vol. 10. No.11, pp. 34-39. (in Russian)
20. Egorov V.A., Kondybaev N.S., Saprykin A.A. (2016). Using capon method to find the coordinates of radiation sources. *T-Comm*. Vol. 10. No.5, pp. 3-7. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Liberovskiy N.Y., junior researcher, Science and Research Department, Moscow Technical University of Communications and Informatics

Priputin V.S., Candidate of Sciences in Technology, head of laboratory, Science and Research Department, Moscow Technical University of Communications and Informatics

Chirov D.S., Doctor of Sciences in Technology, docent, head of department, Moscow Technical University of Communications and Informatics

For citation: Liberovskiy N.Y., Priputin V.S., Chirov D.S. A review of research on adaptive beamforming and digital signal processing. *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 6. Pp. 16-21. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-16-21 (In Rus)

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ В СИСТЕМАХ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

МИРОНОВ Юрий Борисович¹

КАЗАНЦЕВ Сергей Юрьевич²

ШАХОВОЙ Роман Алексеевич³

КОЛЕСНИКОВ Олег Вячеславович⁴

МАШКОВЦЕВА Любовь Сергеевна⁵

ЗАЙЦЕВ Александр Игоревич⁶

КОРОБОВ Александр Владимирович⁷

Сведения об авторах:

¹к.т.н., декан, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия, i.b.mironov@mtuci.ru

²д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия; Московский политехнический университет, г. Москва, s.i.kazantsev@mtuci.ru

³к.т.н., старший преподаватель, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия, r.a.shakhovoi@mtuci.ru

⁴к.т.н., заведующий кафедрой, доцент, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия, o.v.kolesnikov@mtuci.ru

⁵к.х.н., доцент, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия; Всероссийский институт научной и технической информации РАН, г.Москва, l.s.mashkovceva@mtuci.ru

⁶аспирант, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия, a.zaitcev96@yandex.ru

⁷аспирант, Московский Технический Университет Связи и Информатики, г. Москва, Россия, kavmc@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: Проведен анализ основных направлений исследований в области создания источников одиночных фотонов для систем связи с квантовым распределением ключей. **Методы:** Продемонстрирована возможность применения инструментов анализа наукометрической базы данных Scopus для выявления наиболее перспективных разработок и прогнозирования потока научно-исследовательских работ в области источников одиночных фотонов. **Результаты:** Выявлены перспективные платформы для создания источников одиночных фотонов и возможность их применений в коммерческих системах связи с квантовым распределением ключей. Показано, что из истинно однофотонных источников, на сегодняшний день, наиболее хорошо изучены и имеют высокий потенциал в коммерческих приложениях – источники одиночных фотонов на основе квантовых точек. Установлен рост публикационной активности в области источников одиночных фотонов созданных на платформах - центры окраски в нанокристаллах и углеродные нанотрубки, которые считаются наиболее перспективными для создания квантовых информационных систем. Проанализированы возможности создания компактных и удобных в использовании источников одиночных фотонов на телекоммуникационных динах волн. Выявлены точки роста и научный потенциал разных стран в исследованиях по перспективным платформам для источников одиночных фотонов. Установлено, что за счет значительного финансирования научно-исследовательских работ в области источников одиночных фотонов для квантовой информатики лидирующее положение сегодня в этой области сегодня занимают исследовательские группы из КНР и Германии. Значительный прогресс научных групп из КНР в области исследования источников одиночных фотонов на квантовых точках, обусловлен альянсом с научными группами из Германии. Определены журналы, в которых регулярно публикуются работы по источникам для квантовых информационных систем, группы авторов, внесших значительный вклад в разработку современных источников одиночных фотонов, а также основные организации, финансирующие работы по данной тематике. **Обсуждение:** Установлено, что область исследований коммуникационных систем с применением источников одиночных фотонов находится в стадии активного роста, когда фундаментальные достижения начинают успешно реализовываться в технических устройствах с высоким потенциалом коммерческих приложений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: источники одиночных фотонов, квантовое распределение ключей, квантовые телекоммуникации, наукометрический анализ, квантовые технологии

Для цитирования: Миронов Ю.Б., Казанцев С.Ю., Шаховой Р.А., Колесников О.В., Машковцева Л.С., Зайцев А.И., Коробов А.В. Анализ перспектив развития источников одиночных фотонов в системах квантового распределения ключей // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22-33. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-22-33

Введение

Информационные технологии и, в частности, системы связи являются ключевым элементом жизни современного общества [1-3]. Поэтому внедрение передовых технологий связи способствуют прогрессу в самых разных областях: в промышленности, здравоохранении, образовании, сельском хозяйстве, военном деле и безопасности населения. Создание космической группировки спутников, развитие систем космической связи и оптоволоконных сетей соединяющей различные области нашей планеты является основой современных коммуникаций между странами и регионами, чему уделяется значительное внимание, как со стороны научного сообщества, так и отдельных промышленных групп [3-5]. Появление в ближайшем будущем мощных квантовых компьютеров ставит под угрозу безопасность передачи данных в системах связи, основанных на классических технологиях прошлого века, поэтому сегодня для передачи информации требуется использовать квантовые технологии [6, 7]. Действительно, одним из важнейших достижений науки 20 века является создание и развитие квантовой физики, которая стала базой для развития квантовых технологий.

Основными объектами исследования нарождающихся дисциплин, и в первую очередь связанных с телекоммуникациями, являются фотоны [8-10]. В этих технологиях используются квантовые свойства света, что позволяет выполнять операции, которые принципиально невозможны в классических системах. В связи с этим наблюдается настоящий бум развития квантовой информатики, где фотоны используются для кодирования, передачи и обработки информации [10, 11].

Известно, что методы линейной оптики позволяют проводить манипуляции с фотонами, которые двигаются со скоростью света и слабо взаимодействуют с окружающей средой, а значит, могут быстро перемещаться на большие расстояния, что делает фотон самым перспективным кандидатом для реализации кубитов в квантовом компьютере, а также схем квантовой криптографии [6]. При этом сама схема квантовой криптографии, основанная на технологии квантового распределения криптографических ключей (КРК), является наиболее зрелым и коммерчески продвинутым приложением квантовых технологий связи [10, 12].

В данном случае криптографический ключ – это случайная битовая последовательность, которая используется для шифрования информации. Технология КРК позволяет на уровне фундаментальных законов физики гарантировать безопасное распределение ключей между удаленными пользователями по открытым каналам связи. Секретность ключей в КРК основана на двух основных законах квантовой теории: 1) невозможность копирования произвольного квантового состояния (так называемая теорема о запрете клонирования) и 2) невозможность достоверного различения не ортогональных квантовых состояний [14]. Подробные сведения о принципиальных вопросах квантовой криптографии и КРК можно найти в обзорной работе [13], в которой содержится достаточно много ссылок на оригинальные работы, а также обзоры и монографии, посвященные отдельным аспектам КРК.

При реализации большинства схем КРК ключевым элементом является источник одиночных фотонов (ИОФ) [8, 12]. В частности, только при использовании ИОФ абсолютно строго доказывается безопасность квантового канала связи [14]. Поэтому в большинстве протоколов КРК предполагается использование одиночных фотонов [12, 15]. Однако, в современных реализациях КРК, в том числе коммерчески доступных, генерация квантовых состояний осуществляется с помощью лазера [9, 10]. При этом, как известно, лазер не позволяет получать идеальные однофотонные состояния, в результате приходится работать с сильно ослабленными лазерными импульсами, в каждом из которых число фотонов имеет Пуассоновское распределение, что теоретически позволяет злоумышленнику извлечь информацию, зашифрованную в импульсе [15-17]. Стандартным решением этой проблемы является уменьшение среднего числа фотонов, приходящихся на один лазерный импульс, чтобы сделать вероятность появления импульсов с числом фотонов больше одного достаточно малой. Дополнительно с этим может применяться метод приманочных (обманных) состояний [18].

Важно отметить, что использование лазера вместо ИОФ, приводит к существенному уменьшению скорости генерации квантового ключа, поскольку большинство передаваемых лазерных импульсов оказываются пустыми, кроме того, использование обманных состояний значительно усложняет квантовый протокол. В связи с этим сегодня все острее возникает задача создания эффективного ИОФ для применения в устройствах КРК. При этом ИОФ востребованы и в других квантовых технологиях, например, в квантовых компьютерах и устройствах квантовой памяти, причем создание последних позволит в корне решить проблему увеличения дальности систем КРК и может инициировать взрывное распространение систем квантовой связи во всем мире. Поэтому в настоящее время исследовательские группы во многих странах работают над проблемой создания ИОФ, о чем свидетельствует большое количество статей, публикуемой по этой тематике [15, 19, 20]. Целью настоящей статьи являлся системный анализ проблемы создания ИОФ и информации, публикуемой по ним в научных изданиях для выявления основных направлений и достижений в области ИОФ для задач КРК, который позволит выявить перспективные направления и планировать финансирование научно-исследовательских работ в области ИОФ.

2. Постановка задачи и методика анализа

Под ИОФ в настоящей статье понимается устройство, которое по внешнему сигналу генерирует на выходе однофотонное состояние. ИОФ является типичным представителем, так называемых, неклассических источников света [21]. Первое теоретическое описание неклассического источника излучения содержалось в статье [22], а экспериментальные реализации квантовых оптических эффектов, в частности, антигруппировки фотонов, были описаны в работе [23].

В настоящее время на рынке представлены ИОФ, которые можно заказать в некоторых коммерческих фирмах, а в научной литературе и рекламных пресс-релизах регулярно появляются сообщения о повышении качества приготовления

ния однофотонных состояний и эффективности, создаваемых новых ИОФ. Анализ литературы показывает, что источники пар фотонов, где один из фотонов является сигнальным, а второй реализует однофотонное состояние, широко используется в самых разных приложениях: метрологи [24], микроскопии [25], фундаментальных исследованиях метрологи [26]. Спектральный диапазон, в котором производится генерация однофотонных состояний коммерческих ИОФ лежит в области видимого и ближнего ИК диапазона спектра. Однако в лабораториях создаются источники, генерирующие одиночные фотоны от УФ диапазона до микроволновой области. Широкий спектр применений ИОФ затрудняет анализ достижений в области разработки этих устройств. Действительно, при создании ИОФ, применяются несколько, сильно различающихся по используемым материалам и подходам, технологий получения одиночных фотонов, которые будут называться в представленной работе платформами ИОФ.

В настоящее время для выявления основных тенденций в конкретной научной области с успехом применяются методики наукометрического анализа [27, 28]. Поэтому для определения наиболее перспективных платформ для ИОФ и оценке общего потенциала данного направления исследований был проведен анализ потока научно-технической литературы на временном отрезке с 2000 по 2021 годы с использованием инструментов анализа базы данных SCOPUS (БД SCOPUS). При этом в область поиска включались рецензируемые издания и патенты, индексируемые в БД SCOPUS (<https://www.scopus.com>). Следует уточнить, поиск проводился по данным, включенным в базу на 31.10.2021, поскольку база данных непрерывно пополняется, в нее включаются работы за годы, предшествующие текущему, что требуется обязательно учитывать при прогнозировании потока информации на текущий год. Примеры поисковых запросов в БД представлены в таблице 1.

Таблица 1

Примеры запросов в БД SCOPUS

Пример запроса	Результаты запроса
KEY (single-photon sources)	Производится выборка публикаций в БД, в которых в ключевых словах указана фраза «single-photon sources»
KEY (single-photon sources) AND (KEY (carbon nanotube))	Производится выборка публикаций в БД, в которых в ключевых словах указана фразы: «single-photon sources» и «carbon nanotube»

Основной поиск проводился по ключевым словам, в которых должна содержаться фраза «single-photon sources» (источники одиночных фотонов). В дальнейшем, были использованы инструменты анализа БД для выделения публикаций с наибольшим числом цитирований, а также авторов, организаций и стран с наибольшим вкладом в публикационную активность по тематике ИОФ. Отдельно отметим, что инструменты анализа БД СКОПУС позволяют отслеживать организации, осуществляющие финансирование НИР по тематике ИОФ, и получать распределение публикаций по

типу и областям знаний. Анализ обзорных и исследовательских статей с наибольшим уровнем цитирований позволил выделить основные платформы, на которых строятся ИОФ, и провести сравнительный анализ числа таких работ. Кроме публикаций по ИОФ в БД СКОПУС проводился анализ потока научно-технической литературы в смежных областях для выявления общих тенденций в области исследований ИОФ. С этой целью анализировалась динамика публикационной активности в областях, связанных с квантовыми генераторами случайных чисел [29] (КГСЧ) и КРК [11, 12, 30]. Анализ динамики публикаций по выбранным тематикам можно в дальнейшем использовать для прогнозирования НИР в соответствующих областях.

3. Результаты анализа мирового потока научно-технической литературы в области проблемы создания и применений ИОФ

3.1 Мониторинг мирового потока научно-технической литературы, связанной с ИОФ с 2000 по 2021 год

На рисунке 1 показаны зависимость числа публикаций (за год), в которых в ключевых словах была указана фраза «single-photon sources» от года публикации.

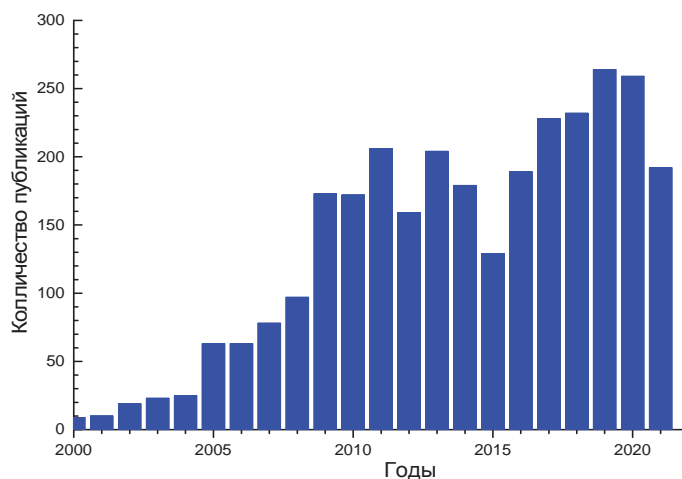


Рис. 1. Зависимость числа публикаций по тематике ИОФ от времени

Из этого рисунка видна общая тенденция роста публикаций по этой тематике, несмотря на то, что в районе 2015 года присутствует резкий провал в количестве публикаций по источникам одиночных фотонов и, в дальнейшем, он нивелируется. Некоторое уменьшение числа рецензируемых публикаций в 2020 году, присутствует во многих областях, что обусловлено снижением общей деловой активности населения, вызванной эпидемиологической обстановкой. Поскольку 2021 год еще не закончен, данные о числе публикаций не полны и будут скорректированы в сторону увеличения в следующем году. На рисунке 2 показана диаграмма, иллюстрирующая вклад различных стран в исследования по тематике ИОФ, из которой видно, что наибольшее количество публикаций сделано авторами из США, Германии и Китая.

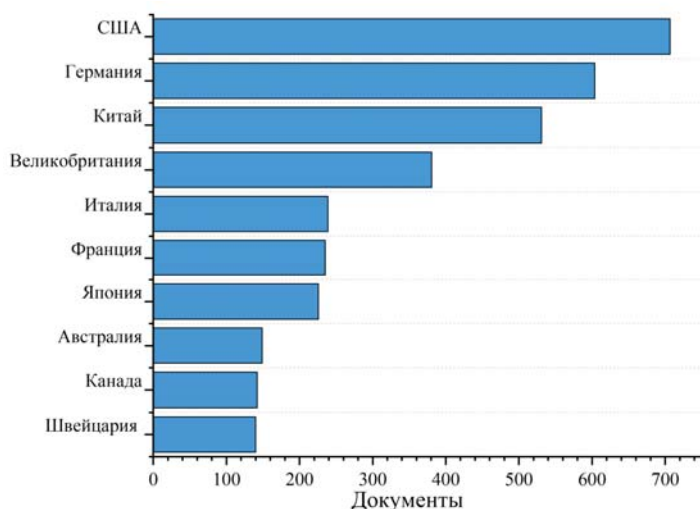


Рис. 2. Вклад стран в публикационную активность по тематике ИОФ за период с 2000 по 2021 годы, показано 10 стран с самыми высокими показателями по научным статьям

Однако в области науки, где ведутся активные исследования, промежуток в 20 лет слишком большой. Наибольшей интерес представляет динамика за небольшой период – от двух до пяти лет. Поэтому на рисунке 3 показаны диаграммы, отражающие вклад различных стран за более короткие промежутки времени.

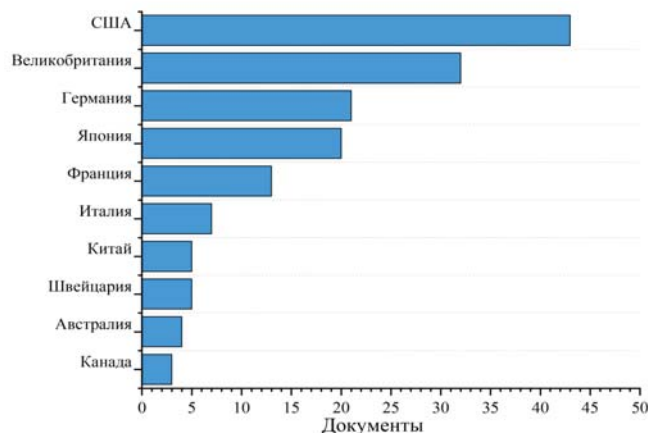
Из рисунка 3 видно, что США и Великобритания, которые были абсолютными лидерами в области ИОФ до 2005 года (рис. 3а), с течением времени утратили свои позиции; исследовательские коллективы из Германии обогнали Великобританию и догнали США, а потом уже исследователи из Китая догнали и перегнали по количеству печатных работ все остальные страны (рис. 3в). Следует заметить, в выборке публикаций по тематике ИОФ с 2000 по 2021 год можно проследить следующие тенденции: тематика публикаций с фундаментальных исследований смещается в сторону прикладных направлений науки.

На рисунке 4 показаны диаграммы, иллюстрирующие распределение публикаций по областям знаний с 2000 по 2005 годы (рис. 4а) и с 2017 по 2021 годы. Видно, что доля работ в предметной области «Физика и астрономия», куда в основном относятся работы фундаментального характера, уменьшается к настоящему времени, а доля в направлении «Инженерные науки» и «Наука о материалах» увеличилась. Эта тенденция может свидетельствовать об окончании этапа глубоких фундаментальных исследований основных принципов работы и выхода на этап проработки реальных устройств ИОФ для различных приложений.

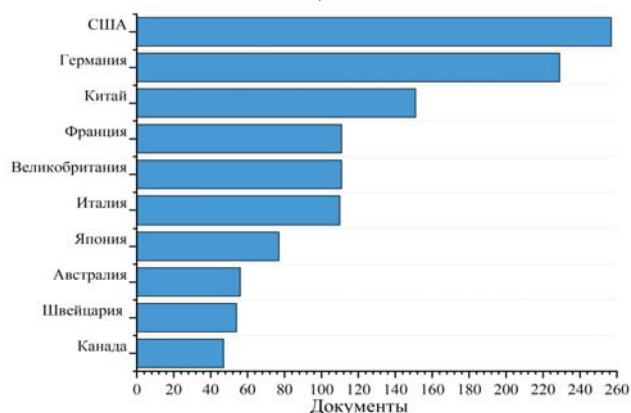
В связи с этим, полезную информацию можно извлечь из анализа количества патентов, выданных за период с 2016 по 2020 годы по тематике ИОФ.

На рисунке 5 показана динамика выпуска патентов в периоды 2000-2020 годы, в которых присутствовали в качестве ключевых слов фразы: «single-photon sources», «quantum random number generator», «quantum key distribution». Патенты за 2021 год не рассматривались, поскольку рассмотрение заявок на патент процесс гораздо более длительный, чем

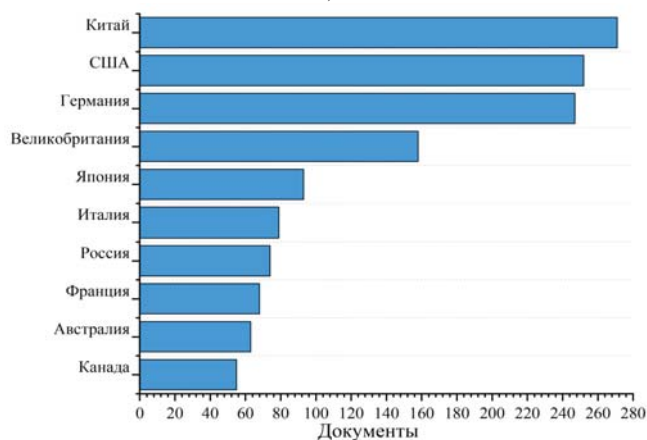
публикация статей, и год еще не закончен. Следует обратить внимание, что, начиная с 2016 года, наблюдается практически экспоненциальный рост выдачи патентов на устройства с КРК, ИОФ и КГСЧ. Примечательно, что даже в условиях пандемии, когда в 2020 году по многим направлениям наблюдалось снижение научной активности, число публикаций по тематике ИОФ в мире продолжает экспоненциально увеличиваться, что свидетельствует о безусловной актуальности данного направления.



а)



б)



в)

Рис. 3. Вклад 10 стран самым высоким уровнем публикационной активности по тематике ИОФ: а) за период 2000-2005годы; б) за период 2010-2015 годы; в) за период 2016-2021 годы

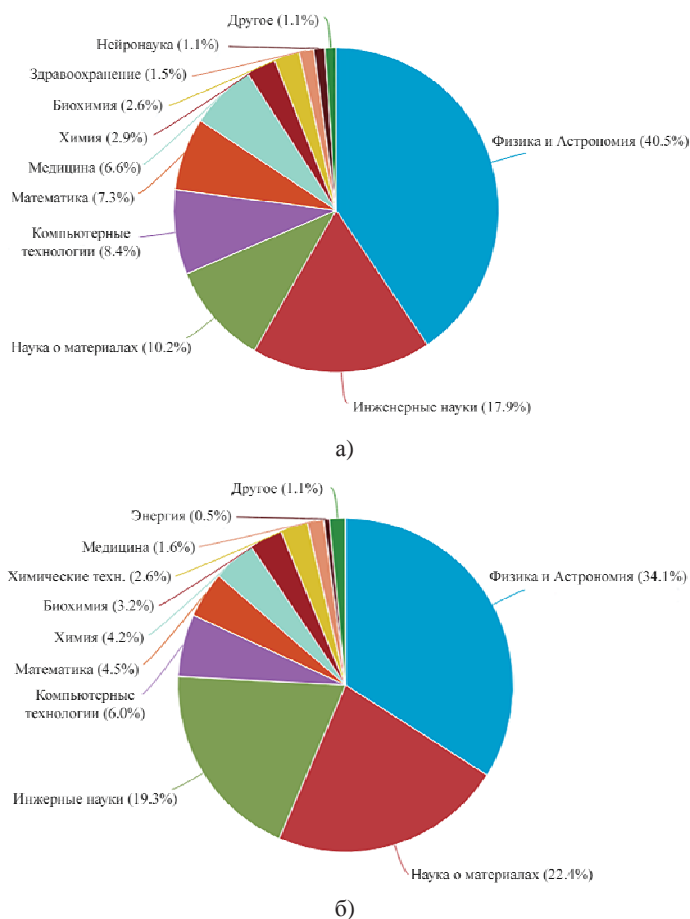


Рис. 4. Распределение публикаций по тематике, связанной с ИОФ по областям знаний: а) за период 2000-2005годы; б) за период 2017-2021 годы.

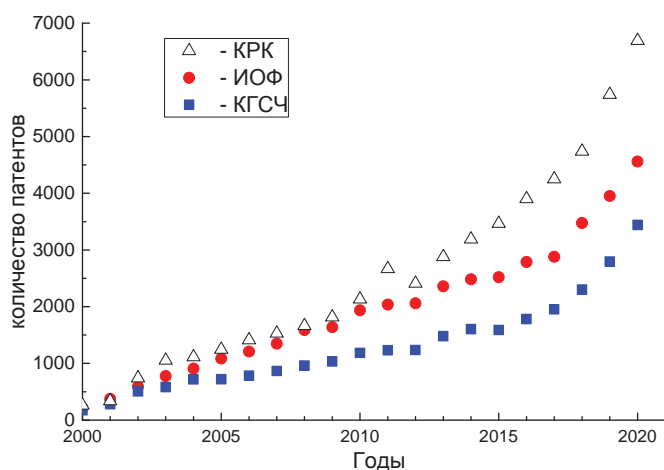


Рис. 5. Зависимость числа выданных патентов на устройства и изобретения в области ИОФ, КГСЧ и КРК от года публикации охранного свидетельства

Если ориентироваться на мировой тренд по числу выданных патентов, можно сделать вывод, что ИОФ вызывают большой интерес для коммерческих приложений, в том числе в области КРК.

Оформление заявки на патент требует определенных материальных затрат, также, как и проведение исследовательских работ, результаты которых можно отслеживать по выходу публикаций в рецензируемых изданиях. Поэтому графики на рисунке 5 отражают, в том числе, значительный рост финансирования, которое выделяется на работы в данных направлениях. При этом анализ публикаций данных тематик показывает значительное пересечение областей исследований. Основываясь на взаимной связи этих областей исследований, можно по изменениям в одной области прогнозировать увеличение или уменьшение достижений или публикационной активности в другой.

В частности, из анализа рынка КГСЧ, представленного Inside Quantum Technology, следует, что в ближайшие годы будет в несколько раз увеличено финансирование НИР в области КГСЧ и прогнозируется существенное увеличения рынка устройств КГСЧ, который составит к 2025 году свыше 6000 млн. дол.

На рисунке 6 показан прогноз группы экспертов из компании Inside Quantum Technology о распределении рынка устройств КГСЧ по различным областям применений (<https://www.insidequantumtechnology.com/quantum-news/>).

Прогноз рынка устройств с КГСЧ (млн. долларов США)

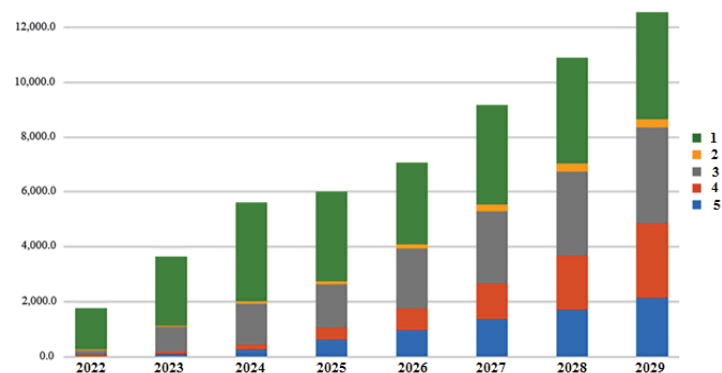


Рис. 6. Прогноз рынка КГСЧ по различным областям применений (по данным Inside Quantum Technology): 1-данные-центры; 2 – телекоммуникации; 3 – финансы; 4 – интернет вещей; 5 – смартфоны

График на рисунке 6 получен на основании данных из открытой части отчета, выложенной на указанном выше сайте. Кроме того, из других открытых источников видно, что страны с развитым технологическим сектором увеличивают инвестиции в области квантовых информационных систем. Так, например, Великобритания объявила о выделении финансирования Квантового центра на сумму свыше 127 млн. долл. в этом году.

Эксперты из Inside Quantum Technology прогнозируют в 2025 году увеличение рынка устройств с КРК в 10 раз по сравнению с 2020 годом. Этот прогноз показан на рисунке 7. Таким образом, на основании указанных выше тенденций можно с уверенностью прогнозировать увеличение интенсивности исследований в области ИОФ и рост финансирования НИР по заявленной тематике.



Рис. 7. Прогноз рынка систем связи с КРК для конечного пользователя, по данным Inside Quantum Technology): 1-прочие отрасли; 2 –армия; 3 – телекоммуникации; 4 – гражданское правительство; 5 – дата-центры.
 (<https://www.insidequantumtechnology.com/quantum-news/>)

Для выявления основных тенденций и перспективных направлений в области ИОФ полезно ограничить область, где проводится более глубокий анализ результатов исследований ИОФ. В таблице 2 перечислены десять журналов с наибольшим содержанием статей по тематике ИОФ за последние 5 лет.

Таблица 2

Топ 10 научных журналов, где публикуются статьи по ИОФ

№	Название журнала	Число публикаций
1	Optics Express	62
2	Physical Review A	61
3	ACS Photonics	47
4	Nano Letters	43
5	Applied Physics Letters	39
6	Physical Review Letters	34
7	New Journal Of Physics	12
8	ACS Nano	18
9	Optic	18
10	Optic Letters	18

3.2 Перспективные платформы и технологии для создания ИОФ

Изучение статей в журналах, перечисленных в таблице 2, и анализ выборки публикаций за последние 5 лет по ключевым словам, позволил выделить основные платформы, на которых создаются современные ИОФ. Подробное описание принципа работы платформ, на которых возможно построение эффективных ИОФ содержится в работах [8, 15, 20, 32] и не входит в задачу настоящей статьи. Из анализа литературы за последние 5 лет были выбраны следующие основные платформы ИОФ:

1. ИОФ на одиночных атомах и ионах,
2. ИОФ на нелинейных эффектах в кристаллах: спонтанный параметрический распад (СПР), либо четырехволновое смешение (ЧВС),
3. ИОФ на квантовых точках (КТ),
4. ИОФ на NV-центрах в алмазе и центрах окраски в нанокристаллах,
5. ИОФ на углеродных нанотрубках (УНТ).

На рисунке 8 показано распределение публикаций в области ИОФ по различным платформам за периоды: а) 2000-2005 годы; б) 2016-2020 годы. Поиск проводился по выборке публикаций, посвященных ИОФ, но исключались обзорные работы, в которых описывалось несколько технологий для получения однофотонных состояний.

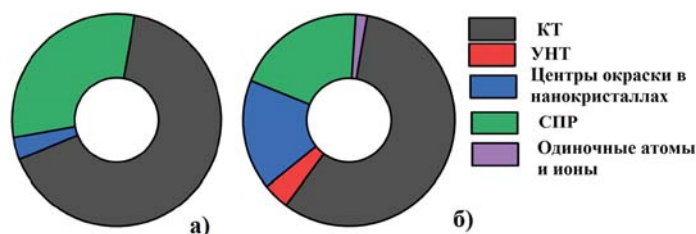


Рис. 8. Распределение публикаций ведущих мировых изданий для различных платформ ИОФ: а) 2000-2005 годы; б) 2016-2020 годы

Как видно из рисунка 8, основное внимание уделяется ИОФ на квантовых точках (КТ), что во многом обусловлено широким спектром применений КТ и доступности КТ для исследований. Если проанализировать отдельно общее количество статей по КТ, то их будет значительно больше, чем публикаций по ИОФ. Значительные успехи в области технологии получения КТ привели к снижению их стоимости, что также повлияло на увеличение научных групп, занимающихся исследованием КТ.

Внимательный анализ ряда работ по КТ показал, что, часто, авторы заняты исследованием различных характеристик КТ, но указывают в ключевых словах ИОФ, как возможное практическое применение результатов своих исследований, что несколько завышает вклад данного направление в разработку реальных устройств ИОФ. В подтверждение этого тезиса можно заметить, что из представленных на рынке коммерческих ИОФ, нам удалось найти лишь два, которые работают на платформе КТ, все остальные использовали различные нелинейные эффекты в кристаллах, в основном СПР [9]. Примечательно, что доля публикаций в мире по ИОФ на нелинейных эффектах по сравнению с прошлыми периодами снизилась. Это связано во много со спецификой принятия публикаций к печати в научных изданиях, поскольку ИОФ на этом принципе уже достаточно исследованы и описаны, а для публикации в журнале требуется такой элемент, как научная новизна.

В тоже время ИОФ на нелинейных эффектах сегодня применяются, как инструмент, а не как предмет исследования, поэтому СПР авторы могут не указывать в ключевых словах. Технические характеристики коммерческого ИОФ на КТ представлены в таблице 3. Этот ИОФ является разработкой французской фирмы Quandela. Значительный интерес может представлять выявление авторов, внесших самый высокий вклад в исследования определенных платформ, на которых создается ИОФ, а также принадлежность этих к различным организациям. БД Скопус позволяет показать сразу до 15 авторов и организаций, которые опубликовали больше всего статей по ИОФ на заданном временном промежутке, либо выявить авторов с самым высоким уровнем цитирования на указанном временном отрезке.

Таблица 3

Технические характеристики ИОФ фирмы Quandela

Параметр	Значение
Технология изготовления	Квантовые точки
Длина волны генерации	925 +/- 5 нм
Частота одиночных фотонов	>24 МГц
$g^{(2)}(0)$	0,
Интерференция Хонг–Оу–Манделя	0,94
Эффективность (яркость)	30%
Чистота генерации одиночных фотонов	> 95%
Неразличимость фотонов	>90%
Время жизни фотонов	250 (+/- 100) пс
Требуемая энергия импульса возбуждения	0.1 пДж (на импульс)
Требуемая рабочая температура	5-8 К
Вес	0,01 кг
Страна разработчик	Франция

На рисунках 9 и 10 приведены диаграммы, отображающие, соответственно, вклад авторов и организаций с наибольшим числом работ.

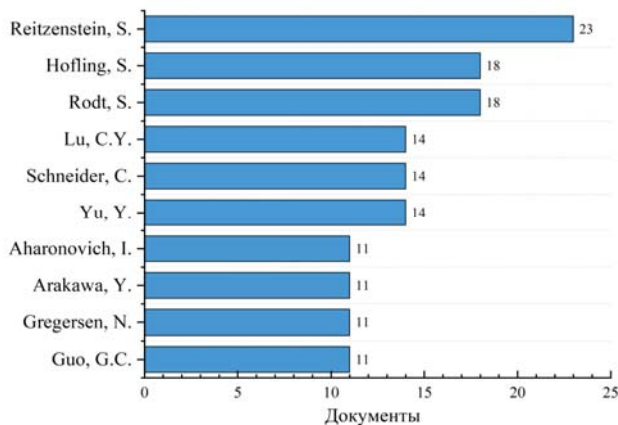


Рис. 9. Распределение авторов с наибольшим количеством статей по тематике ИОФ, опубликованных за 2019-2021 годы

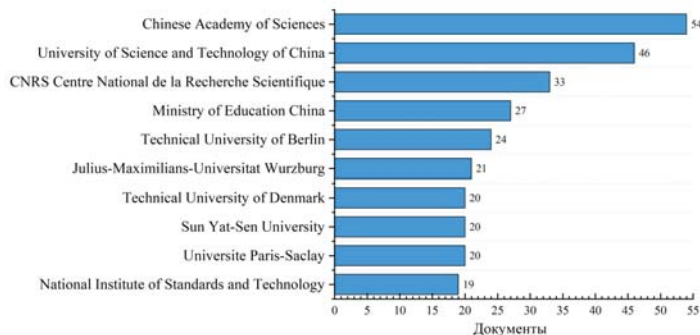


Рис.10. Распределение организаций, сотрудники которых опубликовали наибольшее число статей за 2019-2021 годы

Изучение авторских коллективов, публикующих работы в области ИОФ на платформе КТ, выявило плотное взаимодействие между немецкими научными группами и китайскими. В частности, статьи, входящие в Топ 10 (по данным БД СКОПУС) по цитируемости, написаны совместно, т.е. в

авторском коллективе присутствуют ученые из КНР и Германии.

В ряде обзорных работ, особенно, после 2017 года отмечается высокий потенциал такой платформы для ИОФ, как УНТ [31, 32]. Однако, как видно из рисунка 8б, работы по данному направлению практически не ведутся. Можно сделать предположение, что это связано с технологической сложностью, отсутствием квалифицированных кадров в необходимом количестве и недостаточным финансированием.

Однако это не означает, что УНТ являются неперспективными для квантовых технологий. Наоборот, высокий потенциал данной платформы проявляется при анализе наиболее цитируемых статей за последние два года после исключения работ по КТ. Публикации по УНТ входят в топ 10 самых цитируемых работ при анализе статей, посвященных ИОФ за периоды 2016-2020 и 2019-2021 годы. В отличие от многих других платформ для ИОФ, при использовании платформы на УНТ рассматриваются инициирование генерации одиночного фотона не только лазерным импульсом, но и электрическим импульсом, что может быть более технологичным решением при реализации всего устройства на одном чипе.

Следует отметить такую платформу для ИОФ, как NV-центры в алмазе и центры окраски в ряде других нанокристаллов. В число первых 10 наиболее цитируемых работ по ИОФ на платформе алмаза, входят авторские коллективы из России. Инструменты анализа БД СКОПУС позволяют выделить авторов и их организации, сделавших наибольший вклад в публикационную активность по заданной тематике, что является полезным при планировании совместных проектов. В качестве примера на рисунке 11 приведена диаграмма, иллюстрирующая при содействии каких финансирующих организаций, опубликовано больше всего научных статей по тематике ИОФ. Видно, что в лидеры выбились организации и авторы, чью работу поддерживали фонды КНР.

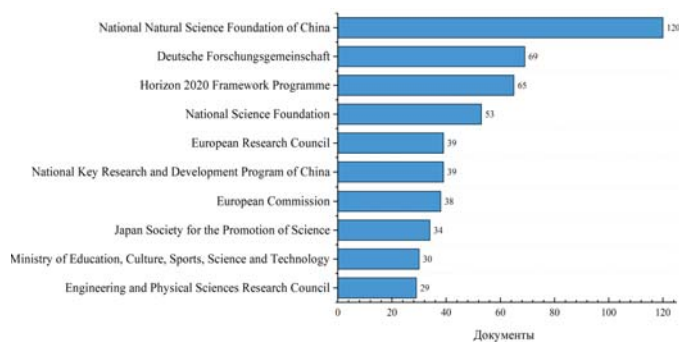


Рис. 11. Распределение финансирующих организаций по числу исследований, выполненных при их содействии

Малый вклад на диаграмме, показанной на рис. 8 такой платформы, как одиночные атомы и ионы, обусловлен сложностью и громоздкостью установок для функционирования ИОФ на этой платформе. По нашему мнению, данная платформа для создания ИОФ, предназначенных для передачи информации в коммерческих системах КРК малоприменяема, однако, при создании устройств квантовой памяти и

квантовых повторителей, она может иметь преимущества перед другими системами, поскольку в этих системах наиболее длительное время удается создавать запутанные состояния в системе атом-фотон [33]. Другое важное преимущество платформы ИОФ на одиночных атомах и ионах – возможность приготовления однофотонных состояний на длинах волн, соответствующих дальней ИК и даже радиочастотной области спектра [29, 33], что пока не доступно для других платформ.

В таблице 4 приведены характеристики ИОФ на основе наиболее цитируемых работ в данной тематике. Как видно из этой таблицы, характеристики ИОФ на разных платформах заметно отличаются и охватывают широкий спектральный диапазон.

Таблица 4

Характеристики ИОФ, созданные на различных платформах

Платформа и материал, из которого изготовлен ИОФ	Длина волны, на которой излучает ИОФ	Эффективность ИОФ, %	Температура, при которой работает ИОФ, К	Максимальная частота повторения импульсов ИОФ, Гц	Корреляционная функция второго порядка, $g^2(0)$	Ссылка
КТ (InGaAs/GaAs)	480-630нм	84%	300	80 МГц	0.32	[40]
КТ Фотонные структуры: InAs/InGaAlAs/InP	1550	18.1%	5К	0.5ГГц	0.05	[41]
КТ InAs на GaAs субстратах	1530–1565	$69.9 \pm 3.6\%$	10К	80МГц	0.038 ± 0.005	[42]
УНТ	1100-1600 нм	75%	220 К 293 К	100 МГц	0.01	[43]

В работах, посвященных ИОФ, обычно определяются такие характеристики источника, как его эффективность и качество генерируемых фотонов. Первое понятие – эффективность – характеризует вероятность того, что по запускаемому импульсу на выходе будет сгенерирован одиночный фотон. В англоязычной литературе часто используется понятие «brightness» (яркость), которое, как раз и характеризует эффективность генерации состояния поля с одним фотоном. Второе понятие – качество ИОФ – характеризует способность ИОФ генерировать именно однофотонные состояния и определяется с помощью эффекта антигруппировки в схеме Хэнбери-Брауна и Твисса [21, 38]. Количественно качество ИОФ характеризуются величиной антикорреляционного параметра второго порядка $g^2(0)$, который для идеального ИОФ должен быть равен 0, а для ряда классических источников света будет больше 1. В экспериментах на интерферометре Хэнбери-Брауна и Твисса величина $g^2(\tau)$ определяется по следующей формуле [37]:

$$g^2(\tau) = \frac{\langle n_1(t) \cdot n_2(t+\tau) \rangle}{\langle n_1(t) \rangle \cdot \langle n_2(t+\tau) \rangle} \quad (1)$$

Здесь $n_1(t)$ и $n_2(t+\tau)$, соответственно, число счета фотонов первого детектора в момент времени t и число отсчетов второго детектора в интерферометре Хэнбери-Брауна и Твисса, зарегистрированных в момент времени $t+\tau$. Угловые скобки обозначают усреднение. Чем меньше величина $g^2(0)$, тем более точно источник генерирует именно однофотонные состояния.

Анализ статей, посвященных повышению эффективности (яркости) ИОФ, выявил следующие технологии, применяемые для увеличения вероятности генерации одиночного фотона в заданном направлении. Основным методом для этого служило помещение одиночного излучателя в нанорезонатор. В зависимости от используемой платформы технология создания такого резонатора варьируется, как и терминология.

В случае ИОФ на центрах окраски или КТ часто используют методы плазмоники и формируют наноплазмонные антенны для получения узкой диаграммы направленности излучения ИОФ. Кроме того, для эффективного направления излучения от ИОФ могут применяться технологии формирования фотонных кристаллов [39]. Подробное описание и ссылки на оригинальные последние работы по увеличению эффективности ИОФ можно почерпнуть из обзоров [8,20].

При анализе наиболее цитируемых работ за последние пять лет также был выявлен значительный интерес к ИОФ, работающих на телекоммуникационных длинах волн [32, 34, 36-37, 41-42]. Данное обстоятельство, по нашему мнению, свидетельствует о переходе от стадии фундаментальных исследований к созданию ИОФ для коммерческих применений в телекоммуникационной индустрии. Значительные успехи, достигнутые в понимании нелинейных эффектов, возникающих в оптическом волокне при распространении классических информационных импульсов [44-49], и создание эффективных ИОФ на диапазон 1550–1565 нм позволит в ближайшем будущем создавать квантовые сети, способные обеспечить передачу большого потока данных с защитой от потенциального взлома с помощью квантовых компьютеров.

Заключение

В статье представлены результаты анализа потока научно-технической информации в области создания ИОФ для задач КРК. Показано, что инструменты анализа базы данных СКОПУС позволяют выявить динамику и основные тенденции в применяемых подходах для создания ИОФ. Определены наиболее перспективные платформы для разработки ИОФ для задач КРК. Установлено, что несмотря на то, что сегодня коммерчески доступны только ИОФ на КТ и нелинейных эффектах в кристаллах, авторитетные исследовательские коллективы возлагают большие надежды с ИОФ на платформе УНТ. Установлен значительный рост публикационной активности в области ИОФ, что, по-видимому, свидетельствует о значительном потенциале коммерческого использования ИОФ в КРК.

Выявлено значительное взаимопересечение трех направлений исследований: исследования ИОФ, КГСЧ и КРК, в которых за промежуток 2016-2020 год наблюдается экспоненциальный рост выданных патентов, что позволяет про-

гнозировать в ближайшие годы значительные инвестиции в область разработок и исследований ИОФ для КРК.

В заключение настоящего обзора следует отметить существование альтернативных подходов для реализации КРК, при которых не используют ИОФ [46]. В частности, хорошо известны нелинейные явления в волоконно-оптических средах, с которыми, обычно, борются [47, 49], но в последнее время предлагается использовать нелинейные свойства среды для создания солитонно-подобного импульса состоящего из перепутанных состояний поля [46, 48].

В работе [50] предлагается осуществлять КРК с помощью таких солитонов. Можно предположить, что подход [50] окажется более перспективным по сравнению с ИОФ при КРК в открытом пространстве, когда невозможно экранирование от внешней засветки, либо присутствуют значительные потери на линии связи [51]. Например, этот подход может использоваться при обеспечении передачи ключей, когда осуществляется оптическая подводная связь [52,53].

Литература

1. Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Y. Classification of personal data security threats in information systems // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2020. Т. 14. № 1, pp. 56-60. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-1-56-60
2. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Предпосылки создания когерентной сети связи общего пользования-основы сквозных цифровых технологий // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 14-22.
3. Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Mytenkov S.S. Features of supporting decision making in modern enterprise infocommunication systems // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2019. Т. 13. № 3, pp. 71-74. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10252
4. Аleshin В.С., Догаев С.Г. Задержки распространения сигналов в сетях спутниковой связи // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2019. Т. 13. № 5. С. 4-11. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10265
5. Федоров С.Е. Синтез оптического цифрового канала связи для автоматизированных систем управления // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2015. Т. 7. № 2. С. 48-52.
6. Бобров И.Б., Борщевская Н.А., Дьяконов И.В., Конратьев И.В., Ковлаков Е.В. и др. Квантовая обработка информации: фундаментальные и прикладные аспекты // Вооружение и экономика. 2020. № 2. С. 33-47.
7. Hasanov M.H., Islamov I.J., Maharramzadeh M.R., Imanguliyev A.G. and etc. About a principle of the prevention of attacks in optical networks // T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. 2019. Т. 13. № 1, pp. 70-75. – DOI 10.24411/2072-8735-2018-10218
8. Eisaman M.D., Fan J., Migdall A., Polyakov S.V. Invited review article: Single-photon sources and detectors //Review of scientific instruments. 2011. Т. 82. № 7. P. 071101. DOI:10.1063/1.3610677
9. Калачев А.А. Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 // Фотоника. 2017. № 1. С. 88-101. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98
10. Martin V., Brito J.P., Escribano C., Menchetti M., White C., Lord A. Quantum technologies in the telecommunications industry // EPJ Quantum Technology. 2021. Т. 8. № 1. P. 19. DOI:10.1140/epjqt/s40507-021-00108-9
11. Бурин Д.А. Квантовое распределение ключей в пассивной оптической сети // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 7. С. 27-29.
12. Быковский А.Ю., Компанец И.Н. Квантовая криптография и комбинированные схемы коммуникационных сетей на ее основе // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 9. С. 777-801.
13. Goldenberg L., Vaidman L. Quantum Cryptography Based on Orthogonal States // Physical Review Letters. Vol. 75. 1995, pp. 1239-1243
14. Молотков С.Н. Квантовая криптография и теоремы ВА Котельникова об одноразовых ключах и об отсчетах //Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 7. С. 777-788.
15. Meyer-Scott E., Silberhorn C., Migdall A. Single-photon sources: Approaching the ideal through multiplexing // Review of Scientific Instruments. 2020. Т. 91. №. 4. P. 041101. DOI:10.1063/5.0003320
16. Хренников А.Ю. Введение в квантовую теорию информации. М.: Физматлит, 2017.
17. Балыгин К.А., Зайцев В.И. и др. Практическая квантовая криптография // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 105. №. 9. С. 570-576. DOI:10.7868/S0370274X17090119
18. Трушечкин А.С., Киктенко Е.О., Кронберг Д.А., Федоров А.К. Стойкость метода обманных состояний в квантовой криптографии //Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 1. С. 93-109. DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038882
19. Aharonovich I., Englund D., Toth M. Solid-state single-photon emitters // Nature Photonics. 2016. Т. 10. № 10, pp. 631-641. DOI:10.1038/nphoton.2016.186
20. Arakawa Y, Holmes M.J. Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview // Applied Physics Reviews. 2020. Т. 7. № 2. P. 021309. DOI:10.1063/5.0010193
21. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Самарцева. М.: Физматлит, 2003.
22. Клышко Д.Н. Когерентный распад фотонов в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т. 6. №. 1. С. 490-492.
23. Kimble H.J., Dagenais M., Mandel L. Photon antibunching in resonance fluorescence // Physical Review Letters. 1977. Т. 39. № 11. P. 691.
24. Slussarenko S., Weston M.M., ets. Unconditional violation of the shot-noise limit in photonic quantum metrology // Nature Photonics. 2017. Т. 11. № 11, pp. 700-703.
25. Ono T., Okamoto R., Takeuchi S. An entanglement-enhanced microscope // Nature communications. 2013. Т. 4. № 1, pp. 1-7.
26. Giustina M., Versteegh M., ets. Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons // Physical review letters. 2015. Т. 115. №. 25. P. 250401.
27. Дымкова С.С. Разработка информационной системы для продвижения результатов научных исследований // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 7. С. 38-41.
28. Буйлова Н.М., Осипов А.И. Научометрический анализ публикаций по наноэнергетике по материалам выпуска РЖ ВИНТИ РАН «Физика нанобъектов и нанотехнология» // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2012. № 11. С. 30-34.
29. Арбеков И.М., Молотков С.Н. Об экстракции квантовой случайности // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 6. С. 651-669. DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038890



30. *Chen J.-P., Zhang C.*, ets. Sending-or-not-sending with independent lasers: secure twin-field quantum key distribution over 509 km // *Physical Review Letters*. 2020. № 124. P. 070501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.070501
31. *Wilk T.* Quantum Interface between an Atom and a Photon. Technische Universität München, 2008.
32. *Cao X., Zopf M.* Ding Telecom wavelength single photon sources // *Journal of Semiconductors*. 2019. Т. 40. №. 7. P. 071901. DOI: 10.1088/1674-4926/40/7/071901
33. *He X., Htoon H.*, ets. Carbon nanotubes as emerging quantum-light sources // *Nature materials*. 2018. Т. 17. № 8, pp. 663-670. DOI:10.1038/s41563-018-0109-2
34. *He X., Hartmann N.F.*, ets. Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp³ defects in carbon nanotubes // *Nature Photonics*. 2017. Т. 11. №. 9, pp. 577-582. DOI:10.1038/nphoton.2017.119
35. *Willis R.T., Becerra F.E., Orozco L.A., Rolston S.L.* Correlated photon pairs generated from a warm atomic ensemble // *Physical Review A*. 2010. Т. 8. № 5. P. 05
DOI:10.1103/PHYSREVA.82.053842
36. *Davidson O., Finkelstein R., Poem E., Firstenberg O.* Multi-plexed source of indistinguishable single photons with tunable GHz-bandwidth at room temperature // *New Journal of Physics*. V. 2021. DOI:10.1088/1367-2630/ac14ab
37. *Agha I., Ates S., Davanço M., Srinivasan K.* A chip-scale, telecommunications-band frequency conversion interface for quantum emitters // *Optics express*. 2013. Т. 21. № 18, pp. 21628-21638. DOI: 10.1364/OE.21.021628
38. *Saleh B.E.A.* Fundamentals of photonics, 3rd Edition. John Wiley & sons, 2019.
39. *Мозилевцев Д.С., Малоштан А.С., Игнатенко А.А., Кулин С.Я.* Эффективный генератор одиночных фотонов, использующий переупутывание излучателя и поля в фотонном кристалле вблизи края провала // *Оптика и спектроскопия*. 2010. Т. 108. № 3. С. 460-467.
40. *Hoang T.B., Akselrod G.M., Mikkelsen M.H.* Ultrafast room-temperature single photon emission from quantum dots coupled to plasmonic nanocavities // *Nano letters*. 2016. Т. 16. № 1, pp. 270-275. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b03724
41. *Wyborski P., Musial A.*, ets. InP-Substrate-Based Quantum Dashes on a DBR as Single-Photon Emitters at the Third Telecommunication Window // *Materials*. 2021. Т. 14. № 4. P. 759. DOI: 10.3390/ma14040759
42. *Zeuner K.D., Jöns K.D.*, ets. On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots // *ACS photonics*. 2021. Т. 8. № 8, pp. 2337-2344. DOI:10.1021/acsp Photonics.1c00504
43. *Ishii A., Uda T., Kato Y. K.* Room-temperature single-photon emission from micrometer-long air-suspended carbon nanotubes // *Physical Review Applied*. 2017. Т. 8. № 5. P. 054039.
44. *Портнов Э.Л., Рабенандрасана Ж.* Определение влияния фазовой самомодуляции и кросс-модуляции на передачу сигналов по оптическому волокну // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2017. Т. 11. № 11. С. 80-83.
45. *Portnov E.L., Rabenandrasana J.* Analysis of the intrachannel nonlinear effects in optical fiber communication systems // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2019. Т. 13. №. 1, pp. 66-69. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10217
46. *Konyukhov A.I., Mavrin P.A., Yadav S., Sobhanan A.* Phase-sensitive amplification in dispersion oscillating fibers // *Laser Physics*. 2021. Т. 31. № 8. P. 085402. DOI:10.1088/1555-6611/ac0dc9
47. *Портнов Э.Л., Рабенандрасана Ж.* Совместное воздействие хроматической, поляризационной модовой дисперсий и фазовой самомодуляции на дисперсионную длину волокна // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2019. Т. 13. №2. С. 31-35. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10233.
48. *Mazhirina Y.A., Melnikov L.A.*, ets. Parametric amplification in optical fibre with longitudinally varying dispersion // *Quantum Electronics*. 2021. Т. 51. № 8. P. 692.
49. *Портнов Э.Л., Рабенандрасана Ж.* Влияние хроматической и поляризационной модовой дисперсий на дисперсионную длину под действием фазовой кросс-модуляции // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2019. Т. 13. № 9. С. 17-21. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10305
50. *Конюхов А.И., Шуркин Л.А.* и др. К проблеме генерации и распознавания солитонных состояний волоконно-оптическими методами // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2019. Т. 155. № 3. С. 446-459.
51. *Абрамова Е.С., Мышкин В.Ф., Хан В.А.* Расчет интенсивности дождя, вызывающего срыв цифровой связи по атмосферному каналу // *T-Comm-Телекоммуникации и Транспорт*. 2019. Т. 13. № 6. С. 5-9. DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10274
52. *Shherbakov A.V., Petruhin G.D., Miroshnikova N.E., Titovets P.A.* Estimation of underwater optical communication link operating distance // *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No 3, pp. 54-60. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-54-60
53. *Zhao S., Li W., Shen Y., Yu Y.* Experimental investigation of quantum key distribution over a water channel // *Applied optics*. 2019. Т. 58. № 14, pp. 3902-3907. DOI:10.1364/AO.58.003902

ANALYSIS OF SINGLE PHOTON SOURCES WITH QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS DEVELOPMENT PROSPECTS

YURI B. MIRONOV

Moscow, Russia, i.b.mironov@mtuci.ru

SERGEY Yu. KAZANTSEV

Moscow, Russia, s.i.kazantsev@mtuci.ru

ROMAN A. SHAKHOVOY

Moscow, Russia, r.a.shakhovoi@mtuci.ru

OLEG V. KOLESNIKOV

Moscow, Russia, o.v.kolesnikov@mtuci.ru

LIUBOV S. MASHKOVITSEVA

Moscow, Russia, l.s.mashkovceva@mtuci.ru

ALEXANDER I. ZAITCEV

Moscow, Russia, a.zaitcev96@yandex.ru

ALEXANDER V. KOROBV

Moscow, Russia, kavmc@mail.ru

KEYWORDS: *single-photon sources, quantum key distribution, quantum telecommunications, scientometric analysis, quantum technologies.*

ABSTRACT

Introduction: The analysis of the main directions of research in the field of creating sources of single photons for communication systems with quantum key distribution is carried out. Scientometric analysis based on Scopus database is used to identify the most promising areas and predict the trends in the field of single photon sources. Methods of single photon sources development and their applications in commercial communication systems with quantum key distribution is shown. At the time single photons sources based on quantum dots are the most developed and presented on the market. However, color centers in nanocrystals and carbon nanotubes are intensively studied. The prospects of creating compact and easy-to-use sources of single photons on telecommunication wavelengths

is analyzed. There are many ways of realization of single photon sources design. Significant funding in China and Germany leads to notable growth of the technology. It was detected the main journals, author groups and organizations working in direction of single photon sources. **Methods and Results:** The research field of communication systems using sources of single photons is growing. It is available single photon sources on quantum dots and crystals. Applying of carbon nanotubes is promising for this problem according to some famous authors. It is revealed significant overlap of the research areas: single photon sources, quantum random number generators and quantum key distribution. At the time fundamental studies are implemented in technical devices with high potential for commercial applications.

REFERENCES

1. Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu. (2020). Classification of personal data security threats in information systems. *T-Comm*. Vol. 14, No.1, pp. 56-60. (In Rus)
2. Ryzhkov A.V., Schwartz M.L. (2021). Prerequisites for the creation of a coherent public communication network – the basis of end-to-end digital technologies. *T-Comm*. Vol. 15. No.7, pp. 14-22. (In Rus)
3. Pavlov S.V., Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Mytenkov S.S. (2019). Features of supporting decision making in modern enterprise information systems. *T-Comm*. Vol. 13. No.3, pp. 71-74. (In Rus)
4. Aleshin V.S., Dogaev S.G. (2019). Signals propagation delays in satellite communication networks. *T-Comm*. Vol. 13. No.5, pp. 4-11. (In Rus)
5. Fedorov S. (2015). Synthesis of the optical digital communication channel for automated control systems. *H&ES Research*. Vol. 7. No. 2, pp. 48-52.
6. Bobrov I. B. et al. (2020). Quantum information processing: fundamental and applied aspects. *Vooruzhenie i jekonomika* [Armament and economy]. 2020. No. 3, pp. 13-30. (In Rus)
7. Hasanov M. H. et al. (2019). About a principle of the prevention of attacks in optical networks. *T-Comm*. Vol. 13. No. 1, pp. 70-75. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10218.
8. Eisaman M. D. et al. (2011). Invited review article: Single-photon sources and detectors. *Review of scientific instruments*. Vol. 82. No. 7, pp. 071101. DOI:10.1063/1.3610677
9. Kalachev A. A. (2017). The element base of long-range quantum communication. Part 1. *Fotonika* [Photonics]. No. 1, pp. 88-101. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98
10. Martin V. et al. (2021). Quantum technologies in the telecommunications industry. *EPJ Quantum Technology*. Vol. 8. No. 1, pp. 19. DOI:10.1140/epjqt/s40507-021-00108-9
11. Birin D. A. (2012). Quantum key distribution in a passive optical network. *T-Comm*. Vol. 6 No. 7, pp. 27-29. (In Rus)
12. Bykovsky A.Y., Kompanets I.N. (2018). Quantum cryptography and combined schemes of quantum cryptography communication networks. *Kvantovaya jelektronika* [Quantum Electronics]. Vol. 48. No 9, pp. 777-801.
13. Goldenberg L., Vaidman L. (1995). Quantum cryptography based on orthogonal states. *Physical Review Letters*. Vol. 75. No. 7, pp. 1239.
14. Molotkov S.N. (2006). Quantum cryptography and v a kotel'nikov's one-time key and sampling theorems. *Uspehi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. Vol. 49. No 7, pp. 750-761.
15. Meyer-Scott E., Silberhorn C., Migdall A. (2020). Single-photon sources: Approaching the ideal through multiplexing. *Review of Scientific Instruments*. Vol. 91. No. 4, pp. 041101. DOI:10.1063/5.0003320
16. Pirandola S. et al. (2020). Advances in quantum cryptography. *Advances in Optics and Photonics*. Vol. 12. No. 4, pp. 1012-1236.
17. Balygin K.A. (2017). Practical Quantum Cryptography. *Pis'ma v Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics]. Vol. 105. No. 9, pp. 570-576. (in Rus)
18. Trushechkin A.S., Kiktenko E.O., Kronberg D.A., Fedorov A.K. (2021). Security of the decoy state method for quantum key distribution.

Uspehi fizicheskikh nauk [Physics-Uspekhi]. Vol. 64. No 1, pp. 88–102.

19. Aharonovich I., Englund D., Toth M. (2016). Solid-state single-photon emitters. *Nature Photonics*. Vol. 10. No. 10, pp. 631–641. DOI:10.1038/nphoton.2016.186

20. Arakawa Y., Holmes M.J. (2020). Progress in quantum-dot single photon sources for quantum information technologies: A broad spectrum overview. *Applied Physics Reviews*. Vol. 7. No. 2. P. 021309. DOI:10.1063/5.0010193

21. Skalli M.O., Zubajri M.S. (2003). *Kvantovaja optika* [Quantum optics]. Moscow: Fizmatlit. (in Rus)

22. Klyshko D.N. (1967). Coherent photon decay in a nonlinear medium. *Pis'ma v ZhETF* [Letters to the JETP]. Vol. 6. No. 1, pp. 490–492. (In Rus)

23. Kimble H.J., Dagenais M., Mandel L. (1977). Photon antibunching in resonance fluorescence. *Physical Review Letters*. Vol. 39. No. 11, pp. 691.

24. Slussarenko S. et al. (2017). Unconditional violation of the shot-noise limit in photonic quantum metrology. *Nature Photonics*. Vol. 11. No. 11, pp. 700–703.

25. Ono T., Okamoto R., Takeuchi S. (2013). An entanglement-enhanced microscope. *Nature communications*. Vol. 4. No. 1, pp. 1–7.

26. Giustina M. et al. (2015). Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons. *Physical review letters*. Vol. 115. No. 25. P. 250401.

27. Dymkova S.S. (2017). Development of information system for promotion of scientific research results. *T-Comm*. Vol. 11. No.7, pp. 38–41. (in Rus)

28. Builova N.M., Osipov A.I. (2012). Scientometric analysis of publications in the area of nanoenergy based on the materials of the peer-reviewed journal of VINITI RAS Physics of Nanoobjects and Nanotechnology. *Nauchno-tehnicheskaja informacija* [Scientific and Technical Information Processing]. Vol. 39. No. 4, pp. 215–219.

29. Arbekov I.M., Molotkov S.N. (2021). Extraction of quantum randomness. *Uspehi fizicheskikh nauk* [Physics-Uspekhi]. Vol. 64. No. 6, pp. 617. DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038890

30. Chen J. P. et al. (2020). Sending-or-not-sending with independent lasers: Secure twin-field quantum key distribution over 509 km. *Physical review letters*. Vol. 124. No. 7. P. 070501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.070501

31. Ripka F. et al. (2018). A room-temperature single-photon source based on strongly interacting Rydberg atoms. *Science*. Vol. 362. No. 6413, pp. 446–449.

32. Cao X., Zopf M., Ding F. (2019). Telecom wavelength single photon sources. *Journal of Semiconductors*. Vol. 40. No. 7, pp. 071901. DOI: 10.1088/1674-4926/40/7/071901

33. He X. et al. (2018). Carbon nanotubes as emerging quantum-light sources. *Nature materials*. Vol. 17. No. 8, pp. 663–670. DOI:10.1038/s41563-018-0109-2

34. He X. et al. (2017). Tunable room-temperature single-photon emission at telecom wavelengths from sp³ defects in carbon nanotubes. *Nature Photonics*. Vol. 11. No. 9, pp. 577–582. DOI:10.1038/nphoton.2017.119

35. Willis R.T. et al. (2010). Correlated photon pairs generated from a warm atomic ensemble. *Physical Review A*. Vol. 82. No. 5. P. 053842. DOI:10.1103/PHYSREVA.82.053842

36. Davidson O. et al. (2021). Bright multiplexed source of indistinguishable single photons with tunable GHz-bandwidth at room temperature. arXiv preprint arXiv:2104.09337. DOI:10.1088/1367-2630/ac14ab

37. Agha I. et al. (2013). A chip-scale, telecommunications-band frequency conversion interface for quantum emitters. *Optics express*. Vol. 21. No. 18, pp. 21628–21638. DOI: 10.1364/OE.21.021628

38. Saleh B.E.A., Teich M.C. (2019). *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons.

39. Mogilevcev D.S. et al. (2010). Efficient single-photon generator based on entanglement between the emitter and field in a photonic crystal near the band edge. *Optics and Spectroscopy*. Vol. 108. No. 3, pp. 425–432.

40. Hoang T.B., Akselrod G.M., Mikkelsen M.H. (2016). Ultrafast room-temperature single photon emission from quantum dots coupled to plasmonic nanocavities. *Nano letters*. Vol. 16. No. 1, pp. 270–275. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b03724.

41. Wyborski P. et al. (2021). InP-Substrate-Based Quantum Dashes on a DBR as Single-Photon Emitters at the Third Telecommunication Window. *Materials*. Vol. 14. No. 4. Pp. 759. DOI: 10.3390/ma14040759

42. Zeuner K. D. et al. (2021). On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots. *ACS photonics*. Vol. 8. No. 8, pp. 2337–2344. DOI:10.1021/acsp Photonics.1c00504

43. Ishii A., Uda T., Kato Y.K. (2017). Room-temperature single-photon emission from micrometer-long air-suspended carbon nanotubes. *Physical Review Applied*. Vol. 8. No. 5, pp. 054039.

44. Portnov E.L., Rabenandrasana J. (2017). The influence of phase self-modulation and phase cross-modulation for the transmission of signals optical fiber. *T-Comm*. Vol. 11, No.11, pp. 80–83. (in Rus)

45. Portnov E.L., Jocelin R. (2019). Analysis of the intrachannel nonlinear effects in optical fiber communication systems. *T-Comm*. Vol. 13. No. 1, pp. 66–69. DOI 10.24411/2072-8735-2018-10217 (In Rus)

46. Konyukhov A.I. et al. (2021). Phase-sensitive amplification in dispersion oscillating fibers. *Laser Physics*. Vol. 31. No. 8. P. 085402. DOI:10.1088/1555-6611/ac0dc9

47. Portnov E.L., Rabenandrasana J. (2021). The combined effect of chromatic dispersion, polarization mode dispersion and phase self-modulation on the dispersion length. *T-Comm*. Vol. 13, No.2, pp. 31–35. (in Rus)

48. Mazhirina Y.A. et al. (2021). Parametric amplification in optical fibre with longitudinally varying dispersion. *Quantum Electronics*. Vol. 51. No. 8, pp. 692.

49. Portnov E.L., Rabenandrasana J. (2019). The effect of chromatic and polarization mode dispersions on the dispersion length under the influence of phase cross-modulation. *T-Comm*. Vol. 13. No.9, pp. 17–21. (in Rus)

50. Konyukhov A. I. et al. (2019). On the all-fiber optical methods of the generation and recognition of soliton states. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. Vol. 128. No. 3, pp. 384–395.

51. Abramova E.S., Myshkin V.F., Khan V.A. (2019). The calculation of the intensity of rain causing digital communication failure through the atmospheric channel. *T-Comm*. Vol. 13, No.6, pp. 5–9 (In Rus)

52. Shherbakov A. V. et al. (2020). Estimation of underwater optical communication link operating distance. *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 3, pp. 54–60. (In Rus)

53. Zhao S. et al. (2019). Experimental investigation of quantum key distribution over a water channel. *Applied optics*. Vol. 58. No. 14, pp. 3902–3907. DOI:10.1364/AO.58.003902

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Mironov Y. B., PhD, Dean, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, i.b.mironov@mtuci.ru

Kazantsev S. Y., PhD, Chief scientific officer, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, s.i.kazantsev@mtuci.ru

Shakhovoy R. A., PhD, Senior lecturer, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, r.a.shakhovoi@mtuci.ru

Kolesnikov O. V., PhD, Head of Department, Docent, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, o.v.kolesnikov@mtuci.ru

Mashkovtseva L. S., PhD, Docent, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, l.s.mashkovtseva@mtuci.ru

Zaitcev A. I., postgraduate student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, a.zaitcev96@yandex.ru

Korobov A. V., postgraduate student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, kavmc@mail.ru

For citation: Mironov Y. B., Kazantsev S. Y., Shakhovoy R. A., Kolesnikov O. V., Mashkovtseva L. S., Zaitcev A. I., Korobov A. V. Analysis of single photon sources with quantum key distribution systems development prospects // H&ES Reserch. 2021. Vol. 13. No. 6. P. 22–33. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-22-33 (In Rus)

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-34-41

ПОТОКИ БАРТЛЕТТА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

ПОСПЕЛОВ

Павел Иванович¹

ТАТАШЕВ

Александр Геннадьевич²

ТЕРЕНТЬЕВ

Алексей Вячеславович³

КАРЕЛИНА

Мария Юрьевна⁴

ЯШИНА

Марина Викторовна⁵

Сведения об авторах:

¹д.т.н., Зав. кафедрой изысканий и проектирования дорог, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, pospelov@madi.ru

²д.т.н., Профессор кафедры высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, a-tatashev@yandex.ru

³д.ф.-м.н., Доцент кафедры деталей машин и теории механизмов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

⁴д.т.н., Зав. кафедры деталей машин и теории механизмов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, karelina@madi.ru

⁵д.т.н., Зав. кафедрой высшей математики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, yash-marina@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение: Класс математических моделей трафика основывается на теории массового обслуживания. В этих моделях заявка поступающая в систему обслуживания, соответствует транспортному средству. При разработке модели трафика, формулируемой в терминах массового обслуживания необходимо задать случайный поток, являющийся входящим для системы обслуживания. Традиционные системы обслуживания с рекуррентным входящим потоком при соответствующих условиях не отражают специфических особенностей реальных транспортных потоков. При определенных условиях может, например, оказаться целесообразным использование в модели потока марковского типа, интенсивность которого зависит от состояния математического объекта, называемого управляющим устройством. В общем случае такой поток может быть задан как неоднородный, причем при таком задании каждой заявке присваивается тип, также зависящий от состояния управляющего устройства. **Цель исследования:** Задание качественной структуры и параметров случайного потока зависит от оценки скоростных характеристик транспортных средств, образующих поток, и, следовательно, связана с вопросами исследования скоростных характеристик реальных транспортных средств. **Результаты:** При достаточно малой плотности автотранспортного потока поступающий поток близок к пуассоновскому. При увеличении интенсивности потока и ухудшении дорожных условий повышается риск совершения обгона и образуются кластеры, состоящие из медленного автомобиля, движущегося впереди, и группой быстрых автомобилей, которые не могут обогнать медленный. В таких случаях можно считать, что поступающий поток представляет собой поток Бартлетта, имеющий следующий вид: кластеры образуют пуассоновский поток, а распределение длины кластера представляет собой двухпараметрическое распределение Бартлетта. Один из параметров этого распределения представляет собой вероятность наличия группы быстрых автомобилей, а второй параметр характеризует распределение числа автомобилей в этой группе. **Обсуждение:** В настоящей работе исследуются вопросы задания качественной вероятностной структуры и количественных параметров случайных потоков, которые являются элементами систем обслуживания, используемых в качестве моделей трафика.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), грант № 20-01-00222.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическое моделирование трафика, автотранспортные потоки, вероятностные модели, случайные потоки, классы вероятностных распределений.

Для цитирования: Поспелов П.И., Таташев А.Г., Терентьев А.В., Карелина М.Ю., Яшина М.В. Потоки Бартлетта и математическое описание автотранспортных потоков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 34-41. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-34-41

1. Введение

Класс математических моделей трафика основывается на теории массового обслуживания. В этих моделях заявка, поступающая в систему обслуживания, соответствует транспортному средству. Наиболее часто системы обслуживания используются в качестве моделей трафика при анализе трафика вблизи пересечений дорог. При разработке модели трафика, формулируемой в терминах массового обслуживания необходимо задать случайный поток, являющийся входящим для системы обслуживания. Традиционные системы обслуживания с рекуррентным входящим потоком при соответствующих условиях не отражают специфических особенностей реальных транспортных потоков. При определенных условиях может, например, оказаться целесообразным использование в модели потока марковского типа, интенсивность которого зависит от состояния математического объекта, называемого управляющим устройством. Такой поток может быть задан как неоднородный, причем при таком задании каждой заявке присваивается тип, также зависящий от состояния управляющего устройства.

Задание качественной структуры и параметров случайного потока зависит от оценки скоростных характеристик транспортных средств, образующих поток, и, следовательно, связано с вопросами исследования скоростных характеристик реальных транспортных средств. При математическом описании автотранспортного потока важно учитывать, что движущиеся на магистрали автотранспортные средства различаются по своим скоростным характеристикам. Наличие в транспортном потоке даже небольшой доли медленных транспортных средств существенно влияет на скорость потока, а также качественно влияет на вероятностную структуру случайного потока, моделирующего транспортный поток. При задании параметров моделей трафика учитываются значения скоростных характеристик автотранспортных средств и их надежности [1], [2]. В таблице 1 приводятся данные о параметрах, характеризующих скорости движения троллейбусов и электробусов (см. Bartlett M.S. The spectral analysis of point processes // J. R. Statist. Soc. B, 1963, vol. 25, № 2, pp. 264-296).

Таблица 1

Параметры движения по маршрутам троллейбусов и электробусов

Маршрут	7	17	34к	119	908	Б2	Т2
Средняя Эксплуатационная скорость, км/ч	15,94	13,36	11,59	11,04	12,4	21,24	14,87
Максимальная скорость, км/ч	54,0	56,10	47,40	45,30	63,5	68	69,9
Протяженность, км	32,12	21,98	21,64	27,80	13,57	17,75	26,67

Как отмечается в [3], во многих работах по математической теории автотранспортных потоков в качестве моделей используются традиционные случайные потоки событий. Но для транспортных потоков важно исследовать не только ве-

роятностные свойства последовательности моментов пересечения автомобилями виртуальной стоп-линии, но и также исследовать случайное расположение автомобилей на магистрали. В 1963 году М. Бартлетт, наблюдая движение автомобилей вблизи Лондона, заметил, что при интенсивном движении и плохой погоде образуются две группы, состоящие из быстрых автомобилей, следующих за медленным при условиях, делающих обгон рискованным. Управляющая система обслуживания, для которой входящие потоки являются конфликтными потоками специального вида.

Математическое моделирование используется при решении задач анализа автотранспортных потоков и организации дорожного движения [4]–[10]. В настоящей работе исследуются вопросы задания качественной вероятностной структуры и количественных параметров случайных потоков, которые являются элементами систем обслуживания, используемых в качестве моделей трафика. В разделе 2 рассматриваются классы рекуррентных потоков, которые используются как входящие потоки в моделях трафика, представляющих собой системы обслуживания. В разделе 3 рассматриваются случайные потоки, которые задаются в системах обслуживания класса, разработанного М.А. Федоткиным. Системы этого класса называются управляющими системами обслуживания. В разделе 4 рассматривается класс случайных потоков, предложенный для математического описания транспортных потоков Е.М. Лобановым. В разделе 5 рассматривается класс потоков, для которых длительность интервала времени потоков фазового типа. Поток этого класса может аппроксимироваться с заданной точностью любой рекуррентный случайный поток. В общем случае можно считать, что входящий поток неоднородный, а именно, полагать, что имеется несколько типов заявок.

В разделе 6 излагается вопрос применения весьма общего класса случайных потоков, в общем случае нерекуррентных. Это класс случайных потоков марковского типа. При использовании системы обслуживания с таким входящим потоком в качестве модели фрагмента дорожной сети фазе работы этого фрагмента соответствует состояние, связанного со случайным потоком математического объекта, называемого управляющим устройством. В общем случае можно считать, что входящий поток неоднородный, при этом задается вероятность принадлежности заявки заданному типу зависит от состояния управляющего устройства.

2. Традиционные случайные потоки, используемые при математическом моделировании трафика

Традиционно при математическом описании автотранспортных потоков использовались случайные потоки события во времени. Моментам наступления событий этих потоков соответствуют моменты пересечения автотранспортными средствами так называемой виртуальной стоп-линии магистрали. Часто принималось допущение, что поток рекуррентный, т.е. длительности интервалов времени между моментами наступления соседних событий являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами. Транспортный поток с небольшими интенсивностями хорошо описывается пуассоновским потоком. Пуассонов-

ский случайный поток событий ввел Ф. Лундберг в 1903 г., когда общей теории случайных потоков не было [11]. Пуассоновский (простейший) случайный поток представляет собой рекуррентный поток событий с экспоненциальным распределением длительности интервала времени между моментами соседних событий потока. Поток этого вида назван пуассоновским, так как число событий потока на интервале времени с заданной длительностью имеет распределение Пуассона, участвующее в формулировке предельной теоремы теории вероятностей. К. Эрланг, создавший в начале XX века теорию массового обслуживания (теорию очередей), вывел формулы для основных характеристик систем массового обслуживания в предположении, что поступающий поток заявок является пуассоновским. С тех пор в математическом моделировании под случайным потоком событий чаще всего понимают поток заявок, поступающих в систему массового обслуживания.

Для задания распределения времени между событиями рекуррентного потока событий, моделирующего транспортный поток, нередко используют распределение из двухпараметрического класса. При этом часто используют класс гамма распределений или класс распределений Вейбулла. Для обоих этих классов верно следующее. Пусть заданы два положительных числа. Тогда параметры распределения из данного класса могут быть заданы, причем единственным образом так, что математическое ожидание будет равным первому из заданных чисел, а дисперсия — второму числу. Если второе число задано квадрату первого, то распределение будет совпадать с экспоненциальным распределением, т.е. экспоненциальное распределение является частным случаем как гамма-распределения, так и распределения Вейбулла. Если отношение дисперсии случайной величины, имеющей гамма-распределение, к математическому ожиданию равно $1/k$, где k – натуральное число, то распределение этой величины совпадает с распределением Эрланга порядка k . Случайная величина, имеющая распределение Эрланга порядка k , распределена так, как сумма k экспоненциально распределенных величин с одним и тем же выбранным соответствующим образом параметром. При $k = 1$ получается экспоненциальное распределение. Рекуррентный поток, для которого длительность интервала времени между соседними событиями потока имеет распределение Эрланга порядка k , то этот поток называется потоком Эрланга этого порядка. При $k = 1$ имеем пуассоновский поток. Если моменты пересечения автотранспортными средствами виртуальной стоп-линии образуют пуассоновский поток с интенсивностью λ и, таким образом, интервал времени между моментами пересечений стоп-линии двумя соседними автомобилями имеет экспоненциальное распределение со средним значением $1/\lambda$, то длительность интервала времени между моментами пересечений стоп-линии двумя автомобилями такими, что между ними находятся $k - 1$ других автомобилей, имеет распределение Эрланга порядка k . Класс гамма распределений является представляет собой один из типов распределения Пирсона. Отметим, что как гамма-распределение, так и распределение Вейбулла имеют широкое применение в математической теории надежности для задания распределения вре-

мени безотказной работы. Распределение Вейбулла ввел в теорию вероятности М. Фреше в 1927 г. [12].

3. Случайные потоки, учитывающие специфику транспортных потоков в условиях затрудненного обгона

В [13] предложен простой механизм образования групп автотранспортных средств в плохих дорожных и погодных условиях.

Предполагалось, что с вероятностью $q = \mu/(\lambda_0 + \mu)$ группа автомобилей содержит только медленный автомобиль и с вероятностью $q = \lambda_0/(\lambda_0 + \mu)$ содержит медленный и хотя бы один быстрый автомобиль, где $1/\mu$ – среднее значение распределенного экспоненциально времени обгона быстрым автомобилем медленного, а λ_0 – интенсивность пуассоновского потока присоединений быстрых автомобилей к группе. В принятых допущениях автотранспортный поток рассматривается как стационарный поток без последствия. Этот поток может быть задан следующим образом. Пусть η – случайное число всех типов автомобилей, пересекающих виртуальную линию магистрали за промежуток $[0, t)$. Тогда вероятность того, что эта величина примет значение k равна

$$P(\eta = k) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{[k/2]} C_{k-i}^i p^{k-2i} q^i \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-i)!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

$[k/2]$ – целая часть $k/2$; $C_n^k = n!/[k!(n-k)!]$; λ — интенсивность потока медленных автомобилей, $\lambda \ll \lambda_0$.

Такой поток относится к классу потоков Гнеденко–Коваленко [14]. Потоки этого класса обладают свойством, в соответствии с которым поток, поступающий в систему обслуживания, удовлетворяющую определенным условиям, имеет аналогичный вид и на выходе системы.

В [15] построена вероятностная модель автотранспортного потока на магистрали. Изложен подход к описанию потока разнотипных требований. Через τ_i обозначается момент поступления i -го требования, $i = 0, 1, 2, \dots$. Последовательность $\{\tau_i : \tau_i \geq 0\}$ находится во взаимно однозначном соответствии со случайным процессом $\{\eta(t) : t \geq 0\}$, где $\eta(t)$ – случайное число разнотипных требований, поступающих в течение промежутка времени $[0, t)$. В общем случае случае предполагается, что длительности интервалов $\tau_{i+1} - \tau_i$ представляют собой зависимые случайные величины с неодинаковыми функциями распределения, $i = 1, 2, \dots$. Строится последовательность τ_i , $i = 0, 1, 2, \dots$, путем задания функциональной зависимости каждого момента τ_i от моментов τ_i , $i = 1, 2, \dots$. Поток $\{\tau_i, i \geq 1\}$ разбивается моментами τ_i , $i = 0, 1, 2$, с целью его более простого описания. Входящий поток представляется в виде векторной случайной последовательности $\{(\tau_i, \eta_i) : i \geq 0\}$, число требований, поступивших за промежуток $[\tau_i, \tau_{i+1}]$.

С помощью предложен поток автомобилей, который наблюдал Бартлетт в 1963 г. Исследование статистических данных Бартлетта, приведенных в виде последовательности длительностей интервалов $\{\tau_{i+1} - \tau_i, i \geq 0\}$, дают возможность определить конечную последовательность независи-

мых случайных величин со смещенным экспоненциальным распределением

$$P(\tau_{i+1} - \tau_i < t) = e^{-(t-h)/\sigma}, \quad t \geq h,$$

где $h = 0.0006$, $\sigma = 23.9312$, а последовательность независимых случайных величин, каждая из которых с вероятностью $p = 441/841$ принимает значение 1 и с вероятностью $q = 400/841$ – значение 2. Так как параметр смещения h приближенно равен нулю, то наблюдаемый Бартлеттом вблизи Лондона транспортный поток можно рассматривать как модификацию потока Гненденко-Коваленко.

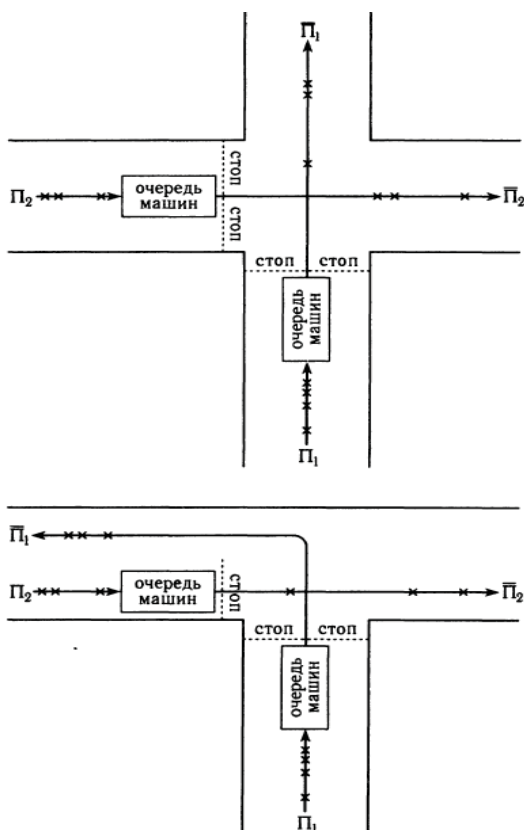


Рис. 2. Схема организации движения транспорта на крестообразном (сверху) и Т-образном (снизу) перекрестках [13]

Поток Бартлетта можно задать как в векторную последовательность $\{(), i \geq 0\}$, где τ_i – моменты пересечения виртуальной стоп-линии медленными автомобилями, а η_i – число всех типов автомобилей, пересекающих стоп-линию в промежутке $\{(\tau_i, \eta_i) : i \geq 0\}$. Поток медленных автомобилей считается пуассоновским с интенсивностью λ_0 . Случайная величина η_i с вероятностью $1 - d$ принимает значение 1 и с вероятностью $d(1 - q)q^{n-2}$ значение $n = 2, 3, \dots$; $0 < d < 1$, $0 < q < 1$. Среднее число требований в группе равно $1 + r(1 - q)^{-1}$. Ясно, что при $d = q$ распределение числа автомобилей в группе становится геометрическим. Значения параметров d и r выбираются на основе статистических данных. При этом используется метод наибольшего правдоподобия.

В виде потоков Бартлетта задаются конфликтные потоки, являющиеся входящими для системы обслуживания, моделирующей поведение системы на перекрестке. Схема организации движения на крестообразном и Т-образном перекрестках изображена на рисунке 2. Через П1, П2 обозначаются входящие потоки, а П1, П2.

Для систем массового обслуживания, для которых входящими являются конфликтные потоки Бартлетта, исследуются качественные свойства, в частности, условия эргодичности. Количественные характеристики этих систем исследуются с помощью численных методов и имитационного моделирования [16].

4. Трехкомпонентный поток

Для описания длительности интервала времени между пересечениями стоп линии автотранспортными средствами используется также трехкомпонентный за кон, предложенный Е.М. Лобановым [17]. Наблюдения за автотранспортными потоками показывают, что поток можно представить в виде комбинации потоков различного типа. Например, после разрешающего сигнала светофора на полосе сначала появляется группа автомобилей, образующая связанный поток, затем в поток вливаются автомобили из примыкающих магистралей, образующие частично связанные группы, и свободно движущиеся автомобили. Таким образом, имеются составные части потока: свободный поток, частично связанный и связанный поток.

Плотность вероятности $p(t)$ интервала времени между пересечениями автомобилями стоп-линии представляется в виде взвешенной суммы плотностей вероятностей такого интервала в трех частях такого потока:

$$p(t) = Ap_1(t) + Bp_2(t) + Cp_3(t),$$

где $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$ – плотности распределения интервалов соответственно в свободном, частично связном и связанном потоке; $A = \lambda_1/\lambda$, $B = \lambda_2/\lambda$, $C = \lambda_3/\lambda$ – доли соответствующих составляющих λ_1 , λ_2 , λ_3 в общей интенсивности λ потока. Функцию $p_1(t)$ можно задать как плотность экспоненциального распределения (т.е. считать поток свободных автомобилей пуассоновским), а функции $p_2(t)$, $p_3(t)$ задать как плотности гамма-распределения.

5. Потоки фазовых типов

Поток Эрланга (п. 2) является простым частным случаем рекуррентного потока заявок, у которого длительность интервала между поступления является распределениями фазового типа.

Приведем определение распределения фазового типа [18]. Рекуррентный поток с распределением времени между моментами поступления называется потоком фазового типа. Понятие распределения фазового типа было введено М. Ньютоном. Неотрицательная случайная величина имеет распределение фазового типа (РН распределение), если ее функцию распределения можно представить в виде

$$F(x) = 1 - \vec{f}^T e^{Gx} \vec{1}, \quad x > 0,$$

где \vec{f} – вектор (пусть m – размерность этого вектора), а $G = (G_{ij})$ – квадратная матрица порядка m такая, что выполняются условия

$$\sum_{j=1}^m G_{ij} \leq 0, \quad G_{ij} \geq 0, \quad G_{ii} < 0, \quad i, j = 1, \dots, m,$$

и, хотя бы для одного значения i выполняется неравенство

$$\sum_{j=1}^m G_{ij} < 0.$$

Распределение фазового типа можно интерпретировать как распределение времени пребывания заявки в сети массового обслуживания следующего вида. Пусть действительные числа v_1, \dots, v_m удовлетворяет условию $v_i \geq -G_{ij}$, $i = 1, \dots, m$, а числа θ_{ij} , $i, j = 1, \dots, m$, определяются следующим образом: $\theta_{ij} = 1 + (G_{ij}v_i)$ при $i = j$, $\theta_{ij} = G_{ij}v_i$ при $i \neq j$. Предположим, что сеть массового обслуживания содержит m узлов. В каждый момент времени в сети находится не более одной заявки, т.е. при наличии в сети заявки входящий поток блокируется. С вероятностью f поступившая заявка направляется в узел i , $i = 1, \dots, m$. С вероятностью $f_0 = 1 - f_1 - \dots - f_m$ заявка минует все узлы и сразу уходит из сети. Время обслуживания заявки в узле i распределено по экспоненциальному закону с параметром v_i , $i = 1, \dots, m$. После окончания обслуживания в узле i , заявка с вероятностью θ_{ij} поступает в узел j и с вероятностью $\theta_{i0} = 1 - \theta_{i1} - \dots - \theta_{im}$ покидает сеть.

В общем случае, можно считать, что входящий поток неоднородный, а именно, можно считать, что имеется несколько типов заявок.

Распределение любой случайной величины, которая принимает неотрицательные значения и, следовательно, может интерпретироваться в модели как длительность интервала времени, можно с любой точностью аппроксимировать распределением фазового типа. Если классу распределений фазового типа принадлежит не только распределение длительности интервала между моментами поступления заявок, но и распределения длительностей таких случайных величин как длительность обслуживания заявки, время безотказной работы обслуживающего прибора и т. д., то можно составить систему линейных уравнений для стационарных вероятностей состояний цепи Маркова, поставленной в соответствие системе обслуживания. При этом состояние цепи Маркова характеризуется не только числом заявок, находящихся в системе, но и значениями дополнительных переменных, представляющих собой фазу генерации заявки, фазы обслуживания заявок и т. д. Из-за введения этих дополнительных переменных размерность цепи может оказаться непреодолимо большой для практических приложений. Однако матрица связанной с системой массового обслуживания цепи Маркова является разреженной (отношение числа ненулевых элементов к числу нулевых мало) и для конкретных видов систем обслуживания разрабатываются учитывающие специфику этих систем численные методы, позволяющие

находить стационарные вероятности соответствующих цепей Маркова при их большой размерности [18]. При этом применяется матрично-векторный подход, который предусматривает представление линейной системы уравнений в матрично-векторной записи, причем это представление системы и представление алгоритма отыскания ее решения используют специальные операции, не относящиеся к наиболее часто рассматриваемым в теории матриц операциям.

6. Потоки марковского типа

Рассматриваемые в предыдущем разделе случайные потоки, для которых длительность интервала между поступлениями заявок является распределением фазового типа, образуют класс рекуррентных потоков весьма общего вида. Однако для более адекватного математического описания автотранспортного потока, особенно на участках вблизи перекрестков, может оказаться более целесообразным использование случайного потока, не являющегося рекуррентным. Из случайных потоков, используемых в моделях массового обслуживания является поток марковского типа (МАР-поток). Приведем его описание.

Имеется марковский процесс с конечным множеством состояний $1, \dots, m$ и непрерывным временем. Этот процесс называется управляющим процессом. Процесс является неприводимым, т.е. из любого его состояния можно за время с конечным математическим ожиданием попасть в любое другое состояние. Если управляющий процесс находится в состоянии i , $i = 1, \dots, m$, то за интервал времени длительностью Δt управляющий процесс с вероятностью $v_{ij}\Delta t + o(\Delta t)$, $\Delta t \rightarrow 0$, переходит в состояние $j \neq i$, $i = 1, \dots, m$, без поступления заявки. С вероятностью $\lambda_{ij}\Delta t + o(\Delta t)$ переходит в состояние j и при этом в систему поступает новая заявка.

Как и для потоков, рассматриваемых в разделе 5, при представлении алгоритмов вычисления характеристик систем обслуживания с входящим потоком марковского типа используется матрично-векторная запись вида, специального для рассматриваемого класса задач.

7. Заключение

Традиционными являются системы массового обслуживания с рекуррентными входящими потоками. Именно такие системы использовались при моделировании автотранспортных потоков. При малых интенсивностях транспортный поток хорошо описывается простейшим частным случаем рекуррентного случайного потока – пуассоновским потоком. При не слишком малых интенсивностях транспортный поток и плохих погодных условиях транспортный поток плохо описывается пуассоновским случайным потоком, что в 1963 г. заметил М. Бартлетт, наблюдая движение автомобильного транспорта вблизи Лондона. М.А. Федоткиным было разработано математическое описание потока Бартлетта и введено понятие управляющей системы с конфликтными потоками Бартлетта. Другой подход к заданию случайного потока, моделирующего автотранспортный поток, предложен Е.М. Лобановым.



В последние десятилетия развивается теория систем обслуживания, в которых время между моментами поступления заявок имеет распределение фазового типа, и системы обслуживания с марковским потоком, интенсивность которого зависит от состояния управляющего устройства, связанного с потоком. В общем случае считается, что входящий поток неоднородный, при этом задается вероятность принадлежности заявки заданному типу зависит от состояния управляющего устройства. При моделировании транспортных потоков случайными потоками транспортного типа состояние управляющего устройства может, например, соответствовать фазе светофора.

Литература

1. Карелина М.Ю., Арифиллин И.В., Терентьев А.В. Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств // Вестник Московского автомобильно-дорожного технического университета (МАДИ), 2018. Т. 52, №1. С. 3-9.
2. Климов А.В., Ухов И.В., Рябцев Ф.А., Карелина М.Ю. Исследование режимов нагружения трансмиссий транспортных средств с тяговым электроприводом // Наука и творчество: вклад молодежи. Сборник материалов всероссийской молодежной конференции аспирантов и молодых ученых. Махачкала, 2020. Изд-во: Типография Формат (Махачкала). С. 228-233.
3. Федоткин М.А., Федоткин А.М. Анализ и оптимизация выходных процессов при циклическом управлении конфликтными транспортными потоками Гнеденко-Коваленко // Автоматика и телемеханика, 12, 2009. С. 92–108.
4. Поспелов П.И., Ле Д.Л. Организация движения на нерегулируемом пересечении с выделенной полосой для наземного общественного транспорта // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), 2021, №2(65). С. 88-95.
5. Поспелов П.И., Ле Дык Лонг, Таташев А.Г., Яшина М.В. Математическая модель сегрегации транспортного потока на пересечении с выделенной полосой для наземного общественного транспорта. В кн.: Проектирование автомобильных дорог: Сб. докладов / Под науч. ред. П.И. Поспелова. М.: А-проджект, 2021. VIII.
6. Pospelov P.I., Belova M.A., Kostsov A.V., A. G. Tatashev A.G., Yashina M.V. Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706766.
7. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. A mathematical model of traffic segregation on multilane road // Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.384
8. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Susoev N.P. Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane, 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2020, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261534.
9. Yashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Duc Long ., Susoev N.P. Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-change probabilities on multilane road before crossroad // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1-5.
10. Pospelov P.I., Le Duc Long, Tatashev A.G., Yashina M.V. Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model // 2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1159 012084.
11. Cram'er H. Historical review of Filip Lundberg's works on risk theory // Scandinavian Actuarial Journal, 1969, vol. 1969, issue sup3, pp. 6-12. DOI: 10.1080/03461238.1969.10404602
12. Frechet M. Sur la loi de probabilit'e de l'ecart maximum, Annales de la Soci'ete Polonaise de Mathematique, Cracovie. 1927. 6, pp. 93-116.
13. Федоткин М.А. Математические модели транспортных потоков на магистрали и на управляемом по циклическому алгоритму перекрестке // Нижний Новгород. Нижегород. гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского, 2009. Деп. в ВИНТИ 11.01.09, № 5-B2009. 30 с.
14. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. 2-е изд. М.: Наука, 1987. 336 с.
15. Федоткин А.М. Моделирование и оптимизация выходных процессов при циклическом управлении конфликтными потоками Гнеденко-Коваленко. Автореферат на соискание уч. степ. канд. наук. Нижний Новгород, 2010.
16. Гольщикова Н.М., Федоткин М.А. Циклическое управление конфликтными потоками в условиях гибели и рождения очередей критических размеров // Автоматика и телемеханика, 1990, №4. С. 68-75.
17. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов. М.: Транспорт, 1990. 240 с.
18. Бочаров П.П., Печинкин А.В. Теория массового обслуживания. М.: Изд-во РУДН, 1995. 529 с.

BARTLETT FLOWS AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF MOTOR TRAFFIC FLOWS

PAVEL I. POSPELOV,
Moscow, Russia, pospelov@madi.ru

ALEXANDER G. TATASHEV,
Moscow, Russia, a-tatashev@yandex.ru

ALEXEY V. TEREPTYEV,
Moscow, Russia

MARIA Yu. KARELINA,
Moscow, Russia, karelina@madi.ru

MARINA V. YASHINA,
Moscow, Russia, yash-marina@yandex.ru

*The work is supported by the Russian Foundation
for Basic Research (project No. RFBR 20-01-00222)*

ABSTRACT

Introduction: The class of mathematical traffic models is based on the theory of queuing. In these models, the application entering the service system corresponds to the vehicle. When developing a traffic model formulated in terms of queuing, it is necessary to specify a random flow that is incoming to the queuing system. **The purpose of the study:** Traditional queuing systems with recurrent incoming flow under appropriate conditions do not reflect the specific features of real traffic flows. Under certain conditions, for example, it may be appropriate to use a Markov-type flow in the model, the intensity of which depends on the state of a mathematical object called the control device. In the general case, such a flow can be specified as non-uniform, and with such a task, each request is assigned a type that also depends on the state of the control device. Setting the qualitative structure and parameters of a random flow depends on the assessment of the speed characteristics of the vehicles that

form the flow, and, therefore, is related to the issues of studying the speed characteristics of real vehicles. **Practical significance:** At a sufficiently low density of the traffic flow, the incoming flow is close to the Poisson one. As traffic increases and road conditions worsen, the risk of overtaking increases and clusters are formed, consisting of a slow car moving in front and a group of fast cars that cannot overtake a slow one. In such cases, we can assume that the incoming flow is a Bartlett flow, which has the following form: clusters form a Poisson flow, and the cluster length distribution is a two-parameter Bartlett distribution. One of the parameters of this distribution is the probability of having a group of fast cars, and the second parameter characterizes the distribution of the number of cars in this group. **Discussion:** In this paper, we study the questions of setting a qualitative probabilistic structure and quantitative parameters of random flows, which are elements of queuing systems used as traffic models.

REFERENCES

1. K elina M.Yu., Arifullin I.V., Terentiev A.V. (2018). Analytical determination of weight coefficients in multi-criteria assessment of the efficiency of vehicles. *Bulletin of the Moscow Automobile and Road Technical University (MADI)*, vol. 52, no. 1, p. 3-9.
2. Klimov A ., Ukhov I.V., Ryabtsev F.A., Karelina M.Yu. (2020). Investigation of loading modes of transmissions of vehicles with traction electric drive. *Science and creativity: the contribution of youth. Collection of materials of the All-Russian youth conference of graduate students and young scientists*. Makhachkala, Publisher: Typography Format (Makhachkala), pp. 228-233.
3. Fedotkin M.A., Fedotkin A.M. (2009). Analysis and optimizati of output processes in the cyclic management of conflict traffic flows Gnedenko-Kovalenko. *Automation and Telemechanics*, 12, p. 92-108.
4. Pospelov P.I., Le D.L. (2021). Organization of traffic at an unregulated intersection with a dedicated lane for ground public transport. *Bulletin of the Moscow Automobile and Highway State Technical University (MADI)*, No. 2 (65), p. 88-95.
5. Pospelov .I., Le Duc Long, Tatashev A.G., Yashina M.V. (2021). Mathematical model of traffic flow segregation at the intersection with

a dedicated lane for surface public transport. In the book: *Designing roads: Sat. reports / Under scientific. ed. P.I. Pospelov. Road Design: Collection of articles / Ed. by prof. Pavel Pospelov. Moscow: A-project, 2021. = Moscow: A project, 2021, VIII.*

6. Pospelov .I., Belova M.A., Kostsov A.V., A. G. Tatashev A.G., Yashina M.V. (2019). Technique of traffic flow evolution localization for calibration of deterministic-stochastic segregation model. *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706766

7. Pospelov P., Kostsov A., Tatashev A., Yashina M. (2019). A mathematical model of traffic segregation on multilane road. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 442-446. DOI: 10.21533/pen.v7i1.384

8. ashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Susoev N.P. (2020). Optimization of regulation parameters for traffic scenario with dedicated public transport lane, *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-6. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261534

9. ashina M.V., Tatashev A.G., Pospelov P.I., Duc Long, Susoev N.P. (2021). Evaluation methodology of distribution of vehicle lane-



change probabilities on multilane road before crossroad. *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-5.

10. Pospelov P.I., Le Duc Long, Tatashev A.G., Yashina M.V. (2021). Methodology of assessing the regulated crossing throughput with a dedicated lane for ground public transport based on a probabilistic model. *2021 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1159 012084.

11. Amer H. (1969). Historical review of Filip Lundberg's works on risk theory. *Scandinavian Actuarial Journal*, vol. 1969, issue sup3, pp. 6-12. DOI: 10.1080/03461238.1969.10404602

12. Pechet M. (1927). Sur la loi de probabilit?e de l'ecart maximum, *Annales de la Societe Polonaise de Mathematique, Cracovie*. no. 6, pp. 93-116.

13. Fedotkin M.A. (2009). Mathematical models of traffic flows on a highway and on a crossroads controlled by a cyclic algorithm. Nizhny

Novgorod. Nizhegorsk state un-t im. N.I. Lobachevsky. Dep. in VINITI 11.01.09, No. 5-B2009. 30 p.

14. Gnedenko B.V, Kovalenko I.N. (1987). Introduction to the theory of queuing. 2nd ed. Moscow: Nauka. 336 p.

15. Fedotkin A.M. (2010). Modeling and optimization of out processes in cyclic control of conflict flows Gnedenko-Kovalenko. Abstract for the competition step. cand. Sciences. Nizhny Novgorod.

16. Golysheva N.M., Fedotkin M.A. (1990). Cyclic control of conflict flows in the conditions of death and birth of queues of critical sizes. *Automation and Telemekhanics*, no. 4, pp. 68-75.

17. Lobanov E.M. (1990). Transport planning of cities. Moscow: Transport. 240 p.

18. Bocharov P.P., Pechinkin A.V. (1995). Queuing theory. Moscow, RUDN University. 529 p.

KEYWORDS: *mathematical modeling of traffic, traffic flows, probabilistic models, random flows, classes of probability distributions.*

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Pavel I. Pospelov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Survey and Design of Roads, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alexander G. Tatashev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Alexey V. Terentyev, Doctor of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Machine Parts and Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Russia

Maria Yu. Karelina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Machines Parts and the Theory of Mechanisms, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Marina V. Yashina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

For citation: Pospelov P.I., Tatashev A.G., Terentyev A.V., Karelina M.Yu., Yashina M.V. Bartlett flows and mathematical description of motor traffic flows. H&ES Reserch. 2021. Vol. 13. No. No 6. P. 34-41. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-34-41 (In Rus)

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ВНЕДРЕНИЯ РОБАСТНОГО НЕВИДИМОГО ЦИФРОВОГО ВОДЯНОГО ЗНАКА В ВИДЕОДАнные

МИШИН

Александр Борисович¹

МОРКОВИН

Сергей Владимирович²

АННОТАЦИЯ

Введение: одним из способов защиты мультимедийной информации от несанкционированного распространения является внедрение цифровых водяных знаков в видеопоследовательность. В данной задаче важнейшим параметром является устойчивость скрытого сообщения, которое должно оставаться извлекаемым после различных воздействий и операций с видеоданными. При этом, метод внедрения скрытого сообщения должен обеспечивать как можно меньшие визуальные искажения видеоданных. **Цель исследования:** повышение робастности и скрытности метода внедрения цифровых водяных знаков в видеопоследовательность. **Методы:** предложена модификация метода внедрения цифровых водяных знаков в видеоданные, заключающегося в дополнении уже известных методов, новыми функциями, базирующихся на принципиальных отличиях видеопотока от статичной фотографии. Для решения поставленной задачи предлагается применить терминативный подход, суть которого состоит в определении техник и способов обеспечения робастности маркера в виде терминаторов угроз. **Результаты:** проведен обзор в области использования различных методов внедрения цифровых водяных знаков в графические изображения. Описана типовая информационная система, в которой используются методы защиты мультимедийного контента от несанкционированного распространения. Рассмотрена модель угроз внедрения цифровых водяных знаков. Представлены общая постановка научной задачи по разработке метода внедрения робастного невидимого цифрового водяного знака в видеоданные и описание этапов предлагаемого метода. Проведен анализ существующих методов и способов повышения робастности цифровых водяных знаков на предмет выделения необходимых техник-терминаторов, позволяющих нивелировать описанные угрозы. Разрабатываемый метод базируется на комплексировании способов и техник терминаторов угроз, определяемых объектом исследования. **Обсуждение:** определение оптимальных значений диапазона частотной области и глубины встраивания маркера требуют проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Сведения об авторах:

¹к.т.н., сотрудник, Академия ФСО России,
г. Орел, Россия, abm@mail.ru

²сотрудник, Академия ФСО России,
г. Орел, Россия, msw-c@ya.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровой водяной знак; стеганография; видеопоток; мультимедийный контейнер; робастность.

Для цитирования: Мишин А.Б., Морковин С.В. Модифицированный метод внедрения робастного невидимого цифрового водяного знака в видеоданные // Научно-технические технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 42-49. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-42-49

Ведение

В настоящее время в связи с постоянно ускоряющимся развитием цифровых глобальных высокоскоростных сетей передачи данных большой интерес приобретает задача защиты мультимедийного контента от незаконного распространения. Актуальность данного направления подтверждается множеством исследований за последнее время в области применения стеганографии в качестве защиты графической информации [1]. Современная цифровая стеганография помимо своего основного направления – скрытой передачи данных, может быть использована для защиты авторских прав, контента. В таком случае ее цель меняется – скрытое сообщение становится «водяным знаком», зачастую невидимым, с помощью которого возможно идентифицировать автора или владельца информации.

Модель угроз цифровых водяных знаков

Разрабатываемый метод маркирования видеоданных принадлежит области теории информационной безопасности (ИБ), в силу чего целесообразно описать нарушителя таких свойств информации как конфиденциальность (в части касающейся предотвращения от утечки), отказоустойчивость (в случае, если утечка произошла по вине конкретного пользователя) и т. п. Логическим продолжением модели нарушителя будет описание модели угроз цифровых водяных знаков (ЦВЗ), с помощью которой станет возможной конкретизация комплексного параметра робастности ЦВЗ.

Имеется некоторая информационная система (ИС), предоставляющая доступ авторизованных пользователей к базе видеоданных. В данном случае, под авторизованным понимается пользователь, предварительно прошедший обязательную идентификацию и аутентификацию. Вопросы, рассматривающие нелегального пользователя и защиты от несанкционированного доступа подобного нарушителя, выходят за рамки данного исследования и относятся к ограничению работы. Необходимо обеспечить контролируемый доступ к видеоданным, их распространение, копирование, обработку и т.д. с целью проведения успешного расследования инцидентов ИБ в случае утечки. Схема информационной системы, обеспечивающая такой функционал приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема информационной системы с маркированием видео

В описываемой системе возможен внутренний нарушитель, представляющий из себя легального пользователя ИС, прошедшего идентификацию, аутентификацию и авторизацию. Предполагается на этих этапах присваивать ему уни-

кальный идентификатор в виде числа, представленного в десятичном либо шестнадцатеричном формате. Для обеспечения нормального функционирования системы достаточно шестизначного десятичного или пятизначного шестнадцатеричного числа (около 1 000 000 пользователей). Такое представление идентификатора и будет выступать в виде ЦВЗ (маркера), встраиваемого в видеоданные.

Для дальнейшего описания модели угроз видео-ЦВЗ необходимо определиться с возможностями нарушителя и априорной информацией о методах защиты, которой он обладает. Пользователь ИС, получивший доступ к видеоданным, может как преднамеренно, зная о маркировании видео, так и, случайно, изменить размеры видеоизображения (сжатие, изменение разрешения), осуществить обрезку-вырезку изображения, перекодировать видео, изменить частоту кадров, обрезать видео по времени, применить фильтры (Гаусса, медианный), конвертировать в монохромное видео. Под угрозой ЦВЗ понимается потенциально возможное действие нарушителя с видеоданными, приводящее к частичному или полному разрушению видео-маркера и исключающее однозначную идентификацию пользователя ИС, осуществившего доступ к видео-ресурсам. Отдельно взятая угроза будет характеризоваться множеством приемов и способов ее реализации. Исходя из положений теории множеств, определим i -тую угрозу, как множество:

$$U = \{u_1^i, u_2^i, \dots, u_k^i\},$$

где u_j^i – j -тый способ реализации i -той угрозы;

Общая модель угроз ЦВЗ будет определяться объединением всех множеств угроз и представлять универсальное множество относительно разрабатываемого метода внедрения ЦВЗ в видеоданные:

$$U = \{U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n\}$$

Полный перечень угроз ЦВЗ, относительно предметной области исследований, приведен в таблице ниже.

Угрозы ЦВЗ, внедренного в видеоданные

Обозначение угрозы	Описание
U_1	Изменение размеров кадра, изменение разрешения изображения, сжатие-растяжение
U_2	Обрезка изображения, вырезание части кадра из общего изображения
U_3	Кодирование и перекодирование видеоданных, компрессия видео с помощью известных кодеков изображения
U_4	Изменение частоты кадров
U_5	Вырезание определенного временного отрезка видео, обрезка по времени
U_6	Применение различных фильтров изображения
U_7	Конвертирование в монохромное видео

Модифицированный метод внедрения цифровых водяных знаков

С целью решения научной задачи по разработке метода внедрения робастного невидимого ЦВЗ в видеоданные предлагается применить терминативный подход. Его суть состоит в определении техник и способов обеспечения робастности ЦВЗ – терминаторов угроз. Тогда разработка метода внедрения робастного маркера будет предваряться анализом существующих методов и способов повышения робастности ЦВЗ на предмет выделения необходимых техник-терминаторов t_j , позволяющих нивелировать соответствующую угрозу. В случае недостатка существующих терминаторов, проведение исследований потребует разработки собственных техник для полного отображения множества угроз в пустое множество:

$$\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle : U \rightarrow \emptyset,$$

где $\langle t_1, t_2, \dots, t_m \rangle$ – множество терминаторов угроз.

Под терминаторами угроз понимаются техники и способы устранения угроз ЦВЗ, используемых в разрабатываемом методе маркирования видеоданных.

Разрабатываемый метод будет состоять в комплексировании способов и техник терминаторов угроз, определяемых объектом исследования. В ходе анализа существующих подходов было выявлено, что внедрение маркера в частотную область и использование для этого наиболее «значимых» спектральных коэффициентов, в некоторых случаях областей спектра, позволяет успешно противостоять изменениям размеров кадра либо разрешения изображения, сжатию-растяжению (множество угроз U_1), а также процедурам обрезки, вырезания части кадра из общего изображения (множество угроз U_2). Наибольшего результата по повышению робастности ЦВЗ достигают техники, использующие низкочастотные (НЧ) и среднечастотные (СЧ) диапазоны спектра изображения, так как они являются наиболее значимыми и менее подвержены искажениям при проведении трансформирующих процедур, описанных множествами угроз U_1 и U_2 . Таким образом, обозначим технику внедрения маркера в значимые области НЧ и СЧ диапазона спектра изображения как t_1 , тогда в определенном диапазоне:

$$t_1 : \{U_1, U_2\} \rightarrow \emptyset$$

Выбор спектрального подхода к внедрению ЦВЗ, повлек за собой необходимость анализа существующих методов спектрального представления изображений. На сегодняшний день практически весь объем методов перевода изображений из пространственной области в частотную, за редким исключением решения специфических задач по обработке, занимают вейвлет-преобразование (ВП) и преобразование Фурье (ПФ) со своим подвидом – косинусным (синусным) преобразованием (КП) [2].

ВП широко применяется в алгоритмах компрессии изображений. Наряду со множеством преимуществ, ВП обладает рядом недостатков, определивших решение по выбору спектрального базиса в сторону ПФ. Так ВП при работе с малыми объемами сигнала, в том числе и изображений, ус-

тупает по качеству оконному ПФ. Также при прочих равных условиях вейвлет-базис требует больших вычислительных ресурсов по сравнению с ПФ, а эффективные и быстрые алгоритмы позволяют получать лишь спектральное представление с потерями. В дополнение вейвлет-преобразование изображение с последующим обратным преобразованием немного его размывает, закругляя острые контуры предметов и внося контурный шум, определяемый эффектом Гиббса [12].

Однако самым главным недостатком преобразования с помощью вейвлетов является необходимость выбора базиса из множества известных. Определение вида и типа вейвлетного базиса зависит от конкретной задачи и специфических особенностей обрабатываемого изображения. Для достижения эффекта от процедур спектрального представления определены некоторые правила выбора вейвлета, однако эти правила работают только для решения конкретной задачи и, в редком случае, могут быть распространены на широкий класс задач. Анализ работ [3-7] показал, что использование вейвлет-преобразования для обработки изображения в частотной области, как правило, требует проведения дополнительных исследований по поиску оптимального базисного вейвлета.

Преобразование Фурье имеет ряд свойств, полезных для процедур внедрения ЦВЗ в видеоданные. Свойство независимости амплитудной части спектра от временного сдвига сигнала в трансляции на обработку изображений можно определить как вспомогательную технику защиты от обрезки-вырезки части изображения. От временного сдвига зависит только фазовый спектр, который в процедуре маркирования не задействуется.

Следующее свойство ПФ – спектр Фурье ограниченного по времени сигнала является бесконечным и, наоборот, ограниченный спектр при обратном ПФ дает бесконечный по времени сигнал. Это свойство транслирует влияние промаркированных коэффициентов спектра на весь сигнал по своей длительности, а, в случае с двумерным ПФ изображения, двукратное влияние на все его пиксели, причем в пропорциональных долях присутствия в той или иной частотной составляющей. Свойство симметрии спектра Фурье позволяет использовать только его положительную (вещественную) составляющую, что дает преимущество в вычислительной сложности алгоритмов, реализующих преобразование Фурье. В дополнение необходимо отметить возможность реализации алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). ПФ обладает свойством концентрации значимых коэффициентов спектра в одной области, обеспечивающей простоту процедуры выделения области для маркирования.

Дискретно-косинусное преобразование (ДКП) представляет собой разновидность ПФ. Оно применяется во многих стандартах компрессии как статических (JPEG), так и видеоизображений (H.263, MPEG-1, MPEG-2 и MPEG-4). Данный факт определяет эффективность использования именно Фурье-базиса для внедрения ЦВЗ в спектральную область видеоданных [10]. К тому же, в случае использования в системе перечисленных выше кодеков, возможно применение так называемого маркирования «на лету». Встраивание маркера может происходить в уже вычисленный видеокodeком

спектр, что значительно снизит вычислительные затраты по внедрению ЦВЗ идентификатора пользователя ИС. Пример внедрения маркера в спектральную область изображен на рисунке 2.

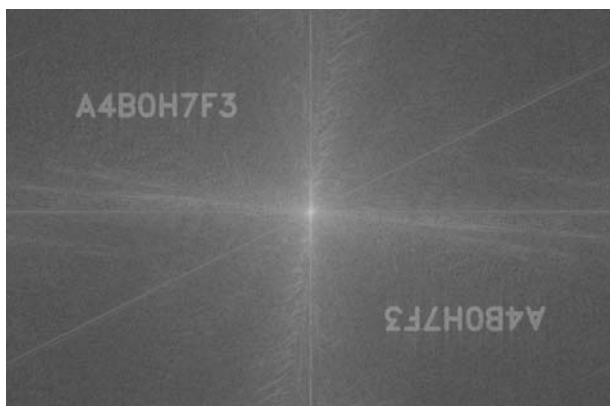


Рис. 2. Пример внедрения маркера в спектральную область

Обозначим подход к внедрению ЦВЗ в виде изображения как технику t_2 , которая позволяет устранить угрозы разрушения маркера за счет кодирования и перекодирования видеоданных, компрессии видео с помощью известных кодеков изображения (множество угроз U_3), а также обеспечивает достаточную робастность в отношении применения различных фильтров (множество угроз U_6). В дополнение, подход к представлению маркера в виде монохромного изображения обеспечивает возможность его извлечения без наличия исходного изображения. В этой связи:

$$t_2 : \{U_3, U_6\} \rightarrow \emptyset$$

$$t_1 \cup t_2 : \{U_1, U_2, U_3, U_6\} \rightarrow \emptyset$$

Комплексирование известных техник и методов позволит обеспечить робастность ЦВЗ в отношении четырех множеств угроз U_1, U_2, U_3, U_6 , оставив без рассмотрения оставшиеся множества модели. Тогда модификация известных методов будет заключаться в дополнении известных способов, техниками-терминаторами множество угроз собственной разработки: по изменению частоты кадров (U_4); по вырезанию определенного временного отрезка видео, обрезке по времени (U_5); по конвертированию в монохромное видео (U_7).

Множества угроз U_4 и U_5 характерны только для ЦВЗ, внедряемых в видеоданные [11]. Ввиду отсутствия в открытой печати достаточной информации о степени проработанности вопросов повышения робастности маркеров видео по отношению к этим угрозам, предлагается применить подход t_3 внедрения ЦВЗ в каждый кадр, рассматривая его как статичное изображение. В рамках защиты ЦВЗ от угрозы U_7 предлагается видеопоток декомпозировать на цветовые составляющие и, в дальнейшем, маркировать каждую из них (техника t_4). В этом случае, гипотетически можно предположить, что в случае монохромной конверсии, цветовой маркер однозначно мигрирует в Фурье-спектр монохромного изображения. В дополнение внедрение ЦВЗ во все три цве-

товых канала ожидаемо приведет к усилению робастности по отношению ко множествам угроз компрессии и фильтрации изображений.

Для повышения показателей скрытности ЦВЗ предлагается применить технику t_5 размытия (скремблирования) влияния шумов внедрения ЦВЗ в спектр по всей пространственной области изображения-контейнера за счет покадрового изменения координат размещения центра маркера идентификатора по закону псевдослучайной последовательности (ПСП). Такое скачкообразное и псевдослучайное перемещение ЦВЗ по всей значимой области спектра от кадра к кадру обеспечит большую глубину встраивания при сохранении свойства «невидимости» или, в данном случае, незаметности искажений в пространственной области изображения-контейнера. Подход по псевдослучайному выбору коэффициентов вейвлет-спектра, в которые внедрялись биты ЦВЗ, уже предлагался в [8]. Однако, встраивание происходило на основе спектральных характеристик встраиваемого маркера в изображение, когда как в данной работе рассматривается спектрально-пространственный подход [9].

В конечном счете модифицированный метод внедрения невидимых ЦВЗ в видеопоследовательность на основе выбранных выше техник будет способен обеспечить робастность по отношению к определенной выше модели угроз:

$$T = t_1 \cup t_2 \cup t_3 \cup t_4 \cup t_5 : U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\} \rightarrow \emptyset$$

Модифицированный метод внедрения ЦВЗ в виде последовательного применения техник-терминаторов угроз состоит из нескольких этапов, описанных ниже.

Первый этап заключается в выполнении техники t_4 , которая основывается на декомпозиции видеопотока на цветовые каналы (красный, зеленый и синий) [13]. На втором этапе осуществляется представление потокового видео в виде множества кадров-изображений-контейнеров, техника t_3 . На следующем этапе применим подход t_1 . Подготовительным этапом техники является перевод изображения из пространственного представления в спектральную область. Выше была обоснована эффективность применения для этих целей базиса Фурье. Вычисление спектра изображения представляет – классическое двумерное ДПФ.

В ходе применения ДПФ вычисляется еще и фазовый спектр изображения, однако, в силу его невосприимчивости человеческим глазом, практического применения он не нашел и в разрабатываемом методе не используется. Каждый кадр цветовой составляющей представляется спектром Фурье и, считается подготовленным к внедрению ЦВЗ. В [14] описан подход к логарифмическому преобразованию коэффициентов спектра Фурье для выравнивания энергетического вклада ВЧ составляющих.

Подобная процедура аналогична кратному масштабированию вейвлет-преобразования. Зачастую в изображениях большие значения спектральных коэффициентов присущи НЧ диапазону и постоянной составляющей. Для выравнивания и нормирования спектра необходимо отфильтровать постоянные составляющие путем логарифмического масштабирования отображения амплитуд, чтобы пара самых мощных гармоник не скрыла остальные, менее мощные, но

тоже существенные гармоники [15]. Таким образом, применение логарифмирования при использовании техники маркирования именно «значимых», наиболее «весомых», областей спектра Фурье, облегчит извлечение и внесет равнозначное зашумление по всему спектру изображения-контейнера.

После того, как спектр изображения-контейнера подготовлен к внедрению маркера, следующим этапом метода выступает процедура определения энергетически «значимой» области спектра – области встраивания ЦВЗ. Предполагается внедрять маркер в область спектра изображения, суммарная энергия которой превышает определенное пороговое значение в относительном соотношении к общей спектральной энергии. Как правило, такая область содержит коэффициенты НЧ, в большей степени, и СЧ, – в меньшей, диапазонов спектра. Определение значений порога требует проведения дальнейших экспериментальных исследований.

На следующем этапе необходимо подготовить сам ЦВЗ, содержащий информацию об идентификаторе пользователя ИС в виде монохромного изображения числа в десятичном или шестнадцатеричном представлении. Размеры изображения должны совпадать с размерами изображения-контейнера и, соответственно, его Фурье-спектра.

Далее важным этапом выступает выбор параметров изображения непосредственно идентификатора пользователя ИС: размера шрифта написания числа, его контрастности и яркости. Размер идентификатора, так же, как и контрастность, будут влиять, с одной стороны, на невидимость ЦВЗ, а, с другой, – на робастность маркера. Яркость по своей сути является известным параметром «глубины» встраивания [16]. Область расположения маркера идентификатора была определена на предыдущем этапе, однако необходимо принять решение о координатах центра маркера в выбранной области.

Во всех известных источниках координаты центра маркера выбираются однократно в начале процедуры внедрения и остаются постоянными от кадра к кадру видеопотока. В ходе исследования была выдвинута гипотеза о том, что статичное зашумление маркером одной и той же части спектральных составляющих негативно сказывается на качестве видеоряда в пространственной области и делает присутствие ЦВЗ заметным [17]. Проявляется это явление в виде искажений первичного динамического изображения.

В этой связи, предлагается постоянные значения координат центра маркера сделать переменными от кадра к кадру, а закон изменения координат определить как псевдослучайный. Такой подход t_5 позволит равномерно распределить шумы встраивания ЦВЗ по «значимой» области спектра Фурье, если координаты центра маркера также будут выбираться случайно, согласно равномерного закона распределения [18]. После определения координат центра маркера и формирования его монохромного изображения с заданными на начальном кадре параметрами шрифта числового идентификатора пользователя ИС, ЦВЗ считается подготовленным для внедрения.

Заключительной процедурой техники t_1 является встраивание подготовленного маркера в преобразованное изображение-контейнер. Процесс внедрения ЦВЗ представляет из себя вычитание из спектральных коэффициентов ДПФ изо-

бражения-контейнера нормированных к спектральному диапазону значений яркости точек монохромного представления маркера числового идентификатора пользователя ИС [19]. Далее выполняется обратное ДПФ спектрального представления изображения-контейнера с внедренным ЦВЗ, после чего производится объединение отдельных цветовых каналов в единое цветное изображение. Заключительным этапом внедрения ЦВЗ в видеоданные выступает объединение множества статичных изображений кадров в потоковое видео.

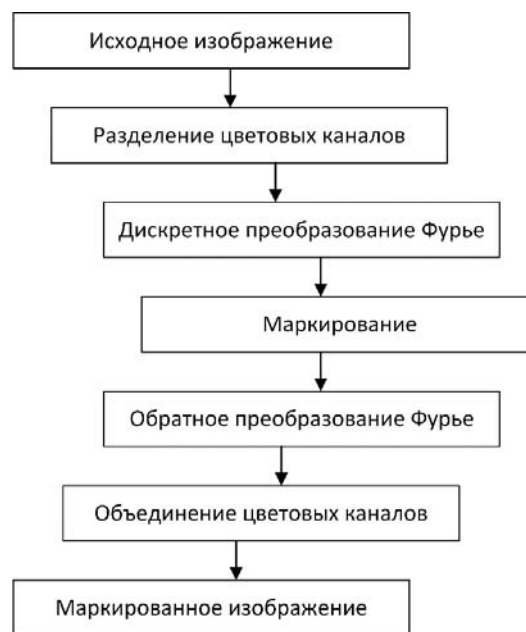


Рис 3. Схема маркирования изображения

Очевидно, что процедура извлечения ЦВЗ, внедренного в видео предлагаемым методом, будет состоять из первых трех этапов процесса маркирования [20]. Ввиду того, что практической целью разрабатываемого метода маркирования видео является повышение эффективности проведения расследований инцидентов информационной безопасности по нарушению правил распространения видеoinформации ограниченного пользования, последующие этапы распознавания наличия ЦВЗ числового идентификатора пользователя ИС, а также его конкретного значения, будут проводиться специалистами ИБ в визуальном (ручном) или автоматизированном режиме [21].

В заключение необходимо отметить, что зависимость свойства скрытности от робастности, комплексность этого свойства ЦВЗ, зависимость частных показателей робастности от правил выбора «значимых» областей спектра Фурье изображения-контейнера, правил выбора площади области спектра, используемой для внедрения маркера, от яркости и контрастности представления маркера в изображении обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований по определению и обоснованию метрики робастности ЦВЗ видеоданных.



Заключение

В статье была разработана модель угроз, позволившая определить предметную область исследований и наметить пути решения научной задачи. Для решения научной задачи, разработанная модель позволила применить терминативный подход, заключающийся в определении техник и способов обеспечения робастности ЦВЗ – терминаторов угроз. В этом случае, разработка метода внедрения робастного маркера предваряется анализом существующих методов и способов повышения робастности ЦВЗ на предмет выделения необходимых техник-терминаторов, позволяющих нивелировать соответствующую угрозу из множества смоделированных.

В ходе проведенного анализа современных методов повышения робастности ЦВЗ в видеоданных и изображениях был выявлен ряд достоинств и недостатков, способствующих впоследствии разработке модифицированного метода внедрения ЦВЗ. В разрабатываемом методе принято решение использовать подход внедрения ЦВЗ в спектральную область видеопоследовательности, рассматривая ее как последовательность статических кадров-изображений. Результаты анализа позволили выделить СЧ и НЧ диапазоны спектра изображения как наиболее перспективные, что было впоследствии подтверждено результатами экспериментальных исследований.

В качестве типа спектрального преобразования обоснован выбор базиса Фурье. Внедряемый маркер принимает вид числа-идентификатора пользователя ИС, получающего доступ к видеоданным ограниченного распространения. Внедрение осуществляется в каждый кадр каждого цветового канала видео. Предлагаемый метод был модифицирован авторским подходом к выбору позиции в спектральной области изображения внедряемого маркера. Его координаты предлагается изменять в каждом кадре по закону ПСП.

Литература

1. Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В. Обзор методов встраивания информации в цифровые объекты для обеспечения безопасности в «интернете вещей» // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 1. С. 137-154. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-1-137-154>.
2. Евсютин О.О., Кокурина А.С., Мещеряков Р.В. Стеганографическое встраивание дополнительных данных в снимки дистанционного зондирования земли с помощью метода QIM с переменным шагом квантования в частотной области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 8. С. 155–162. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2221>.
3. Козачок А.В., Копылов С.А., Мещеряков Р.В., Евсютин О.О., Туан Л.М. Подход к извлечению робастного водяного знака из изображений, содержащих текст // Труды СПИИРАН. 2018. № 5(60), С. 128-155. <https://doi.org/10.15622/sp.60.5>.
4. Шумская О.О., Будков В.Ю. Сравнительное исследование методов классификации в стегоанализе цифровых изображений //

Научный вестник НГТУ. 2018. № 3 (72). С. 121-134. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2018-3-121-134>.

5. Шумская О.О., Железны М. Адаптивный алгоритм встраивания информации в сжатые JPEG-изображения на основе операции замены // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5. С. 44-56. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-44-56>.
6. Shumskaya O.O., and Iskhakova A.O. Application of digital watermarks in the problem of operating signal hidden transfer in multi-agent robotic system // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2019. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2019.8729669>.
7. Dey A., Bhattacharya S., Chaki N. Software watermarking: Progress and challenges. INAE Letters, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 65-75.
8. Chen Z., Wang Z., Jia C. Semantic-integrated software watermarking with tamper-proofing. Multimedia Tools and Applications, 2018, vol. 77, no. 9, pp. 11159-11178.
9. Muhammad K., Ahmad J., Rehman N., Jan Z., Sajjad M. CISSKA-LSB: color image steganography using stego key-directed adaptive LSB substitution method. Multimedia Tools and Applications, 2017, vol. 76, no. 6, pp. 8597-8626.
10. Xiang L., Li Y., Hao W., Yang P., Shen X. Reversible natural language watermarking using synonym substitution and arithmetic coding. Computers, Materials and Continua, 2018, vol. 55, no. 3, pp. 541-559.
11. Xiang L., Wang X., Yang C., Liu P. A novel linguistic steganography based on synonym run-length encoding. IEICE transactions on Information and Systems, 2017, vol. 100, no. 2, pp. 313-322.
12. Ma H., Jia C., Li S., Zheng W., Wu D. Xmark: Dynamic Software Watermarking using Collatz Conjecture. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2019, vol. 14, no. 11, pp. 2859-2874.
13. Wang Y., Gong D., Lu B., Xiang F., Liu F. Exception handling-based dynamic software watermarking. IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 8882-8889.
14. Hai N. M., Ogawa M., Tho Q. T. Packer identification based on metadata signature. In: Proceedings of the 7 th Software Security, Protection, and Reverse Engineering / Software Security and Protection Workshop, 2017, pp. 1-11. DOI 10.1145/3151137.3160687
15. Ahmadvand M., Pretschner A., Kelbert F. A taxonomy of software integrity protection techniques. Advances in Computers, 2019, vol. 112, pp. 413-486.
16. Nematollahi M. A., Vorakulpipat C., Rosales H. G. Software Watermarking. Digital Watermarking, 2017, vol. 11, pp. 131-144.
17. Ahmadvand M., Hayrapetyan A., Banescu S., Pretschner A. Practical Integrity Protection with Oblivious Hashing. In: Proceedings of the 34 th Annual Computer Security Applications Conference, 2018, pp. 40-52.
18. Deeba, F., Kun, S., Dharejo, F.A., Langah, H., Memon, H. Digital Watermarking Using Deep Neural Network. Int. J. Mach. Learn. Comput. 2020, 10, pp. 277-282.
19. Mun, S.M., Nam, S.H., Jang, H., Kim D., Lee H.K. Finding robust domain from attacks: A learning framework for blind watermarking. Neurocomputing 2019, 337, pp. 191-202.
20. Zhong X., Huang P.C., Mastorakis S., Shih F.Y. An Automated and Robust Image Watermarking Scheme Based on Deep Neural Networks. IEEE Trans. Multimed. 2021, 23, pp. 1951-1961.
21. Moosazadeh M., Ekbatanifard G. A New DCT-Based Robust Image Watermarking Method Using Teaching-Learning-Based Optimization. J. Inf. Secur. Appl. 2019, 47, pp 28-38.

MODIFIED METHOD OF IMPLEMENTING A ROBUST INVISIBLE DIGITAL WATER SIGN INTO VIDEO DATA

ALEKSANDER B. MISHIN

Orel, Russia, abm@mail.ru

SERGEY V. MORKOVIN

Orel, Russia, msw-c@ya.ru

KEYWORDS: *digital watermark, steganography, video stream, multimedia container, robustness.*

ABSTRACT

Introduction: one of the ways to protect multimedia information from unauthorized distribution is the introduction of digital watermarks in the video sequence. In this task, the most important parameter is the stability of the hidden message, which should remain retrievable after various impacts and operations with video data. At the same time, the method of implementing a hidden message should provide as little visual distortion of video data as possible. **Purpose:** to increase the robustness and secrecy of the method of introducing digital watermarks into the video sequence. **Methods:** a modification of the method of introducing digital watermarks into video data is proposed, which consists in supplementing the already known methods with new functions based on the fundamental differences between a video stream and a static photo. To solve this problem, it is proposed to apply a terminative approach, the essence of which is to determine the techniques and methods for ensuring the robustness of the marker in the form of threat terminators.

Results: an overview of the use of various methods of introducing digital watermarks into graphic images is carried out. A typical information system is described, which uses methods to protect multimedia content from unauthorized distribution. The model of threats to the introduction of digital watermarks is considered. The general statement of the scientific task of developing a method for introducing a robust invisible digital watermark into video data and a description of the stages of the proposed method are presented. The analysis of existing methods and methods of increasing the robustness of digital watermarks is carried out in order to identify the necessary terminator techniques that allow leveling the described threats. The developed method is based on the integration of methods and techniques of threat terminators determined by the object of research. **Discussion:** determining the optimal values of the frequency domain range and the depth of embedding of the marker require further experimental studies.

REFERENCES

1. Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V. (2019). Obzor metodov vstraivaniya informatsii v tsifrovye ob"ekty dlya obespecheniya bezopasnosti v "internete veshchei" [A review of the methods of embedding information in digital objects for security in the Internet of things]. *Komp'yuternaya optika* = Computer Optics. Vol. 43(1), pp. 137-154. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-1-137-154> (In Russ.).
2. Evsyutin O.O., Kokurina A.S., Meshcheryakov R.V. (2019). Steganograficheskoe vstraivanie dopolnitel'nykh dannykh v snimki distantsionnogo zondirovaniya zemli s pomoshch'yu metoda QIM s peremennym shagom kvantovaniya v chastotnoi oblasti [Steganographic embedding of additional data into the images of earth remote sensing by QIM method with a variable quantization step in the frequency domain]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, vol. 330. 8, pp. 155-162. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/8/2221> (In Russ.).
3. Kozachok A.V., Kopylov S.A., Meshcheryakov R.V., Evsutin O.O., Tuan L.M. (2018). Podkhod k izvlecheniyu

robastnogo vodyanogo znaka iz izobrazhenii, sodержashchikh tekst [An approach to a robust watermark extraction from images containing text]. *Trudy SPIIRAN* = SPIIRAS Proceedings, vol. 5(60), pp. 128-155. <https://doi.org/10.15622/sp.60.5>. (In Russ.).

4. Shumskaya O.O., Budkov V.Yu. Sravnitel'noe issledovanie metodov klassifikatsii v stegoanalize tsifrovyykh izobrazhenii [Comparative study of classification methods in the stegoanalysis of digital images]. *Nauchnyi vestnik NGTU* = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. 2018, vol. 3 (72), pp. 121-134. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2018-3-121-134> (In Russ.).

5. Shumskaya O.O., Zelezny M. (2018). Adaptivnyi algoritm vstraivaniya informatsii v szhatye JPEG-izobrazheniya na osnove operatsii zameny [Adaptive algorithm of replacement-based embedding of data into compressed JPEG images]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* = Information and Control Systems, vol. 5, pp. 44-56. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2018-5-44-56> (In Russ.).

6. Shumskaya O.O., and Iskhakova A.O. (2019). Application of digital watermarks in the problem of operating signal hidden transfer in multi-agent robotic system. *2019 International*



Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). doi: 10.1109/SIBCON.2019.8729669

7. Dey A., Bhattacharya S., Chaki N. (2019). Software watermarking: Progress and challenges. *INAE Letters*, vol. 4, no. 1, p. 65-75.

8. Chen Z., Wang Z., Jia C. (2018). Semantic-integrated software watermarking with tamper-proofing. *Multimedia Tools and Applications*, vol. 77, no. 9, p. 11159-11178.

9. Muhammad K., Ahmad J., Rehman N., Jan Z., Sajjad M. (2017). CISSKA-LSB: color image steganography using stego key-directed adaptive LSB substitution method. *Multimedia Tools and Applications*, vol. 76, no. 6, p. 8597-8626.

10. Xiang L., Li Y., Hao W., Yang P., Shen X. (2018). Reversible natural language watermarking using synonym substitution and arithmetic coding. *Computers, Materials and Continua*, vol. 55, no. 3, p. 541-559.

11. Xiang L., Wang X., Yang C., Liu P. (2017). A novel linguistic steganography based on synonym run-length encoding. *IEICE transactions on Information and Systems*, vol. 100, no. 2, p. 313-322.

12. Ma H., Jia C., Li S., Zheng W., Wu D. (2019). Xmark: Dynamic Software Watermarking using Collatz Conjecture. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 11, p. 2859-2874.

13. Wang Y., Gong D., Lu B., Xiang F., Liu F. (2018). Exception handling-based dynamic software watermarking. *IEEE Access*, vol. 6, p. 8882-8889.

14. Hai N. M., Ogawa M., Tho Q. T. (2017). Packer identification based on metadata signature. *Proceedings of the 7th Software Security, Protection, and Reverse Engineering / Software Security and Protection Workshop*, pp. 1-11. DOI 10.1145/3151137.3160687

15. Ahmadvand M., Pretschner A., Kelbert F. (2019). A taxonomy of software integrity protection techniques. *Advances in Computers*, vol. 112, pp. 413-486.

16. Nematollahi M.A., Vorakulpipat C., Rosales H.G. (2017). Software Watermarking. *Digital Watermarking*, vol. 11, pp. 131-144.

17. Ahmadvand M., Hayrapetyan A., Banescu S., Pretschner A. (2018). Practical Integrity Protection with Oblivious Hashing. *Proceedings of the 34th Annual Computer Security Applications Conference*, 2018, pp. 40-52.

18. Deeba, F., Kun, S., Dharejo, F.A., Langah, H., Memon, H. (2020). Digital Watermarking Using Deep Neural Network. *Int. J. Mach. Learn. Comput.* no. 10, pp. 277-282.

19. Mun, S.M., Nam, S.H., Jang, H., Kim D., Lee H.K. (2019). Finding robust domain from attacks: A learning framework for blind watermarking. *Neurocomputing*, no. 337, pp. 191-202.

20. Zhong X., Huang P.C., Mastorakis S., Shih F.Y. (2021). An Automated and Robust Image Watermarking Scheme Based on Deep Neural Networks. *IEEE Trans. Multimed.* No. 23, pp. 1951-1961.

21. Moosazadeh M., Ekbatanifard G. (2019). A New DCT-Based Robust Image Watermarking Method Using Teaching-Learning-Based Optimization. *J. Inf. Secur. Appl.* 47, pp. 28-38.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Mishin A.B., PhD, employee of the Academy of Federal Guard Service of Russia

Morkovin S.V., employee of the Academy of Federal Guard Service of Russia

For citation: Mishin A.B., Morkovin S.V. Modified method of implementing a robust invisible digital water SIGN into video data // H&ES Reserch. 2021. Vol. 13. No. No 6. P. 42-49. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-42-49 (In Rus)

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-50-59

ВЕРИФИКАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСКРАШЕННЫМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

ТИХОНОВ

Валерий Александрович¹

НОВИКОВ

Владимир Александрович²

АННОТАЦИЯ

Введение: сложность разрабатываемых информационных систем повышает требования к безошибочному проектированию системы разграничения доступа и увеличивает вероятность наличия и влияние уязвимостей на состояние защищенности накапливаемой и обрабатываемой информации. Формальная верификация проекта информационной системы на этапе разработки позволяет минимизировать появление архитектурных уязвимостей. Изменения, проводимые регуляторами в области сертификации средств защиты информации, актуализируют вопросы, связанные с разработкой и анализом формальных моделей.

Цель исследования: разработка подхода к построению и формальной верификации моделей, обладающего наглядностью, полнотой и результативностью анализа. **Методы:** построение моделей математическим аппаратом раскрашенных сетей Петри в среде моделирования CPN Tools с последующим исследованием свойств сети. **Результаты:** разработан подход, обладающий структурной, логической и динамической полнотой и непротиворечивостью. Наглядность моделей, разработанных с использованием представленного подхода, снижает время обнаружения некорректного функционирования и последующей разработки компенсирующих мер с последующим подтверждением их эффективности. Исследование пространства состояний показала необходимость дополнения среды моделирования решающими правилами для полного построения или расчета пространства состояний в случае сложных моделей и большого числа маркеров при начальной маркировке сети Петри. **Практическая значимость:** разработанный подход предлагается применять при формальной верификации моделей управления доступом и фильтрации потоков информации в процедуре сертификации средств защиты информации и при проектировании сложных информационных систем. Доказательность и простота подхода позволяет внедрить процедуру формальной верификации в этапы разработки различного рода систем. **Перспективы развития:** разработка дополнительного программного обеспечения, позволяющего строить полное пространство состояний для сложных моделей, а также дополнение метода подходами, использующими ASK-CTL логику.

Сведения об авторах:

¹инженер-исследователь Акционерного общества "Технологии радиоконтроля"
г. Санкт-Петербург, Россия,
v.tihonov@ao-trk.ru

²д.т.н. Лауреат премии Президента РФ в области науки и инноваций
Начальник испытательного центра
Акционерного общества "Технологии радиоконтроля", г. Санкт-Петербург,
Россия, v.novikov@ao-trk.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: формальная верификация, информационная безопасность, раскрашенные сети Петри, моделирование, оценка соответствия.

Для цитирования: Тихонов В.А., Новиков В.А., Верификация систем управления доступом на основе моделирования раскрашенными сетями Петри // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 50-59.
doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-50-59



Введение

В реализации современных проектов неотъемлемую часть занимают информационные технологии. Программное обеспечение используется для автоматизации и управления деятельностью, обработки и передачи информации как в коммерческих компаниях, так и в государственных структурах. Практически непрерывный рост объема данных, критичность информации и объемы задач, решаемые при автоматизации различных процессов, приводят к недостаточной проработке вопроса управления разграничением доступа и, как следствие, появлению архитектурных неустраняемых уязвимостей.[1],[2] В последние годы, для уменьшения количества уязвимостей в программном обеспечении средств защиты информации [3] в процедуру сертификации внесен этап формальной верификации. Он требует наличия и исследования формальной модели для механизмов, реализующих управление доступом и фильтрацию информационных потоков. Авторами проанализированы различные подходы и изучены среды, позволяющие выполнять верификацию механизмов разграничения доступом. Применяющиеся методы формальной верификации моделей управления доступом, характеризуются высоким порогом вхождения, не обладают наглядностью и сложны с точки зрения внесения изменений для коррекции или адаптации. В связи с этим был развит подход, основанный на аппарате раскрашенных сетей Петри снижающий влияние известных недостатков.

Описание подхода

Разработанный подход основан на соответствии модели структурным, логическим и динамическим характеристикам исследуемой системы.[4] В данном случае и далее, под системой понимается разрабатываемая информационная система, программное обеспечение или их составные части. Математическим аппаратом, используемым для построения моделей, является аппарат раскрашенных сетей Петри.[5][6] Раскрашенные сети Петри — это расширение классических сетей Петри описанных в [7].

Структура модели определяется составом элементов и их взаимосвязью. Она должна соответствовать описанию, приведенному в конструкторской документации (в ряде случаев в задании по безопасности), на основе которой разрабатывается система. Для соблюдения этого требования элементы модели сопоставляются с элементами, составляющими функциональные требования системы. Таким образом, полное соответствие элементов модели и элементов функциональных требований позволяет доказать структурное соответствие модели и системы. Структурной характеристикой в аппарате сетей Петри является ориентированный двудольный граф.

Логическая составляющая модели задаётся после формирования структуры модели в виде набора взаимосвязанных условий функционирования сети Петри – правил срабатывания переходов. Данные условия формулируются до начала моделирования и соответствуют условиям, определяющим работу механизмов и свойства исследуемой системы.

Динамической характеристикой модели являются её поведенческие особенности в процессе имитационного моделирования. Корректно построенная модель в процессе моделирования находится в состояниях, соответствующих состояниям исследуемой системы. При этом осуществляется подтверждение корректности системы за счет доказательства нахождения системы в безопасных состояниях. Безопасные состояния формируются на основе условий и свойств функционирования, описанных в конструкторской документации. Так, например, для классической модели мандатного управления доступом безопасные состояния — это состояния, в которых выполняются правила простой безопасности, *-правило и правило дискреционной безопасности.[8]

Сформированная с учётом описанных характеристик модель исследуется с помощью различного рода симуляций и анализа пространства состояний. На основе пространства состояний определяется наличие или отсутствие запрещенных траекторий функционирования системы. Симуляция позволяет наглядно продемонстрировать запрещенные варианты функционирования системы, а также при внесении дополнительных элементов, моделирующих различного рода нарушения изучить влияние этих нарушений на систему в целом, оценить последствия рисков проявления нарушений и действенность угроз.

Построение модели

Для подтверждения практической значимости и корректности разработанного метода приведен пример создания и анализа модели системы, основанной на классической модели с мандатным управлением доступа Белла-ЛаПадулы. Выбор классической модели обоснован её широкой известностью в научных кругах. [9][10] Для построения и анализа раскрашенных сетей Петри используется инструмент CPN Tools. CPN Tools предназначен для разработки, симуляции и анализа раскрашенных сетей Петри. [11][12] Выбор средства обоснован широким функционалом и возможностью добавлять собственные плагины, расширяющие сферу применения. [13][14][15].

На основании формального описания модели Белла-ЛаПадулы сформированы множества цветов (colorset – в рамках CPN Tools), соответствующие множествам классической модели. При этом на основе атомарных цветов, определяющих базовые элементы модели, сформированы составные цвета, моделирующие более сложные сущности, необходимые для построения модели. Далее определены необходимые структурные элементы сети Петри – позиции и переходы. Позиции являются элементами накопления и отображения, а переходы элементами, моделирующими события в системе. Набор позиций и переходов определяется по формальному описанию элементов системы и содержит минимально необходимые элементы, значимые для системы. При этом возможность использования подходов иерархичной разработки облегчает задачу построения сети Петри. [16][17][18][19] Построенный граф сети Петри с учётом описанного выше представлен на рисунках 1-5.

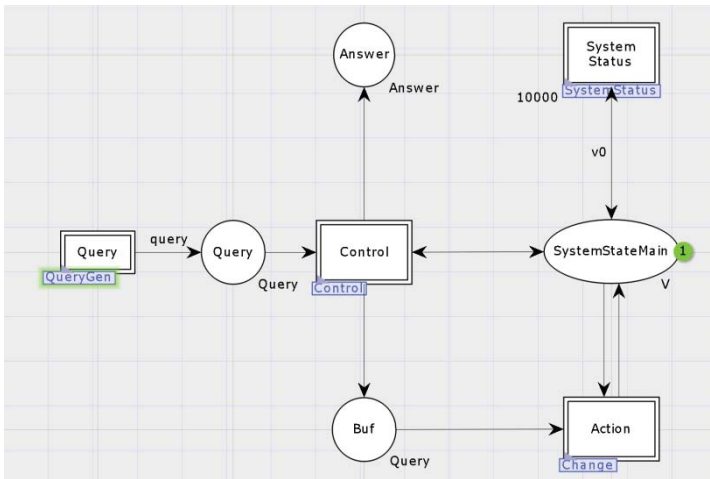


Рис. 1. Верхний уровень сети Петри модели Белла-ЛаПадуды

Данная сеть Петри является верхним уровнем модели и отображает основные части системы, реализующие её функционирование: запрос, проверка запроса на корректность, изменение состояния системы. Переходы-замещения, соответственно “Query”, “Control”, “Action”.

Позиция “SystemStateMain” моделирует текущее состояние системы. Маркер данной позиции является составным и отображает текущее состояние системы описываемое:

- существующими доступами в системе;
- матрицей доступа;
- текущим множеством функций конфиденциальности.

Позиция “Answer” предназначена для отображения отрицательного ответа системы на возникающий запрос добавления доступа в состояние системы. Позиции “Query” и “Buf” являются позициями, объединяющими разные подсети Петри и предназначены для передачи запросов между элементами модели.

Переход “Query” моделирует возникновение запроса. При этом он является переходом-замещением и содержит «вложенную» сеть Петри, представленную на рисунке 2.

Позиции и переходы, представленные на рисунке 2, моделируют запросы к системе на:

- изменение множества текущих доступов,
- изменение функции конфиденциальности,
- изменение прав доступа в матрице.

Маркеры, содержащиеся в данных позициях, моделируют соответствующие типу позиции запросы в системе. Позиции “St” являются вспомогательными и предназначены для отображения типа запроса и устранения коллизий запросов.

Переход “Control” на рисунке 1 моделирует контроль запроса на изменение множества текущих доступов в соответствии с правилами классической мандатной модели. При этом он является переходом-замещением и содержит «вложенную» сеть Петри, представленную на рисунке 3.

Позиция “In2” является входной позицией подсети и содержит проверяемый запрос. Позиция “V” является позицией, моделирующей текущее состояние системы и, по своей сути, является позицией “SystemStateMain” из сети Петри, изображенной на рисунке 1.

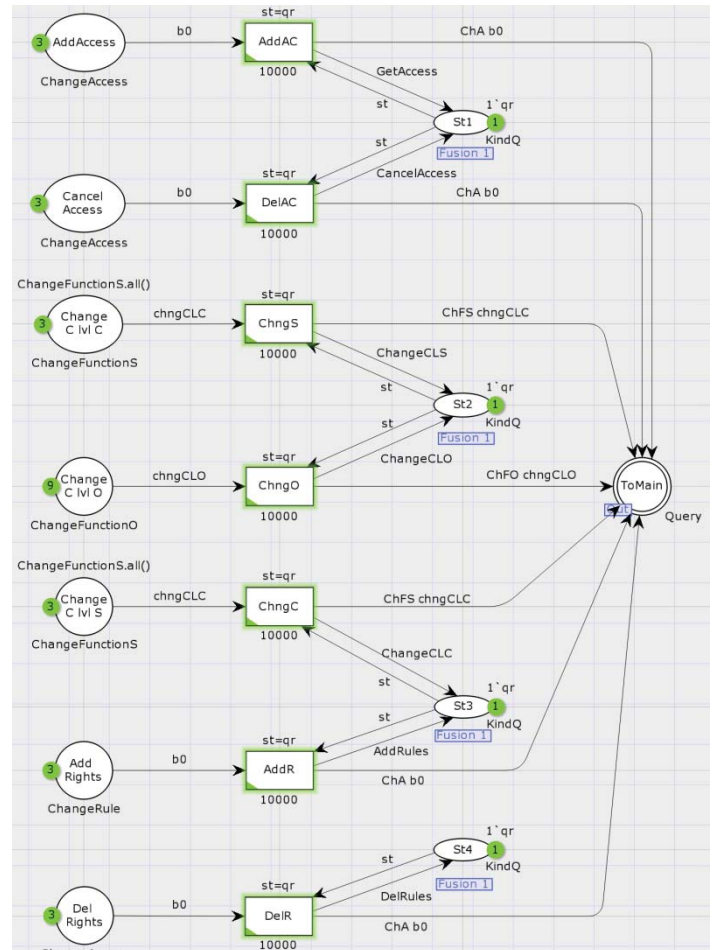


Рис. 2. Сеть Петри, моделирующая поступление запроса

Позиция “Out” является позицией, содержащей результат проверки соответствия запроса правилам безопасности. Позиция “Buf” является позицией, предназначенной для передачи запроса на следующий элемент сети Петри верхнего уровня, реализующей изменения состояния системы. По сути является позицией “Buf” из сети Петри, изображенной на рисунке 1, а позиция “Out” позицией “Answer”.

Переходы “SS Property”, “Star Property” и “DS-Property” моделируют нарушение правил «Простой безопасности», «*-правила» и «Дискреционного правила» соответственно. При возникновении нарушения маркер моделирующий запрос помещается в позицию “Out” и дальнейшая обработка запроса прекращается. Таким образом, изменение в множество текущих доступов не вносится. Переход “ALL OK” моделирует корректность запроса относительно перечисленных ранее правил и помещает маркер, моделирующий запрос в позицию “Buf”.

Переход “Action” на рисунке 1 моделирует изменение состояния системы в соответствии с правилами классической мандатной модели. При этом он является переходом-замещением и содержит «вложенную» сеть Петри, представленную на рисунке 4.

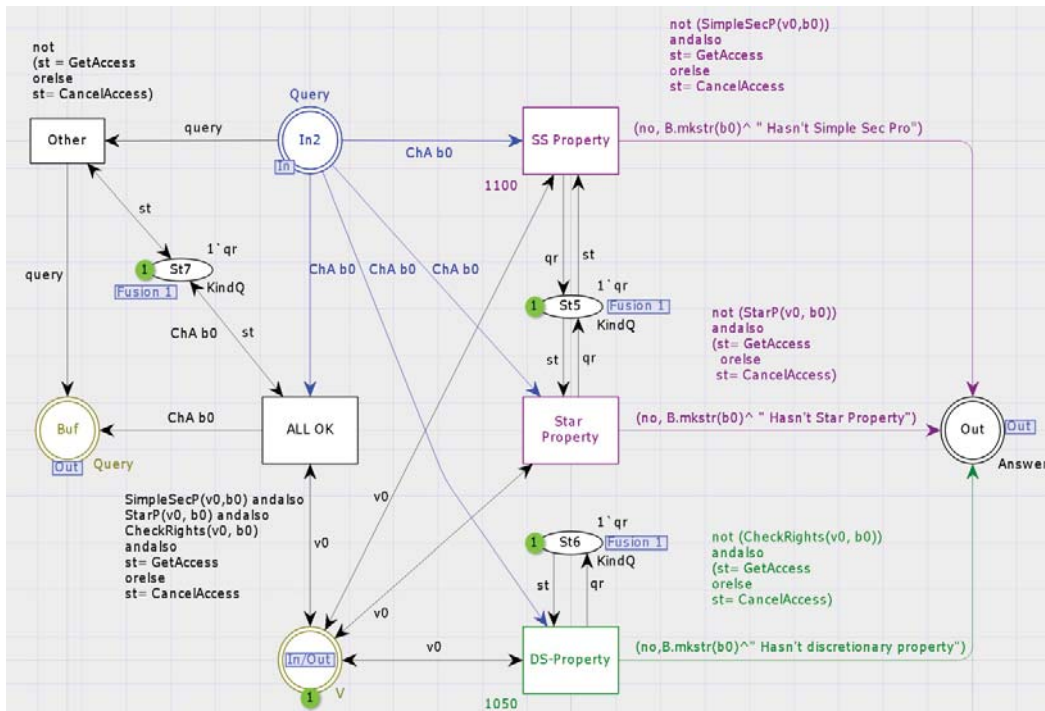


Рис. 3. Сеть Петри, моделирующая проверку соответствия правилам

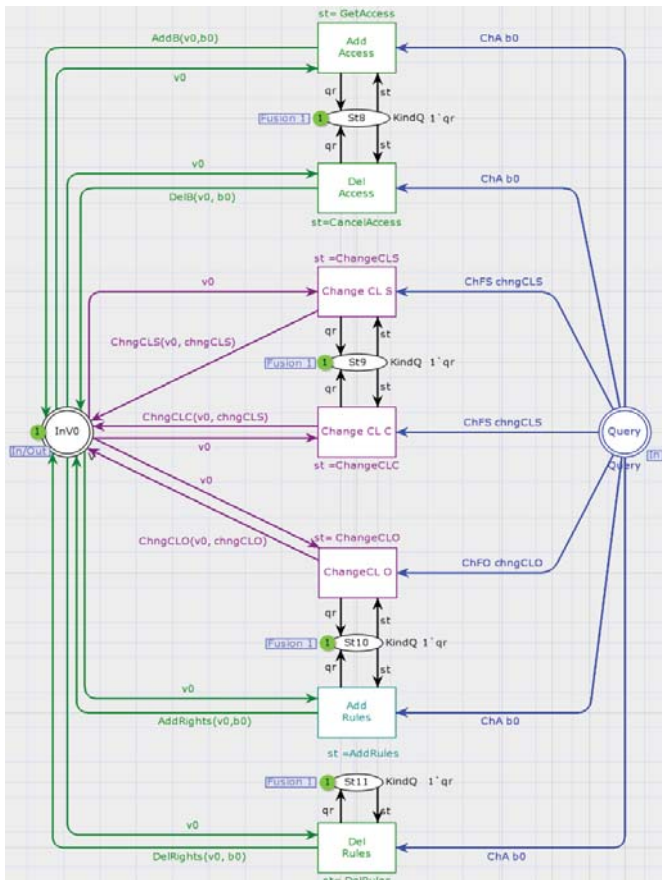


Рис. 4. Сеть Петри, моделирующая изменения в текущем состоянии системы

Позиция “InV0” является позицией, моделирующей текущее состояние системы, по своей сути является позицией “SystemStateMain” из сети Петри, изображенной на рисунке 1. Позиция “Query” моделирует поступление запроса и по своей сути является позицией “Buf” из сети Петри, изображенной на рисунке 1.

Сеть Петри, изображенная на рисунке 5 предназначена для контроля безопасного состояния системы.

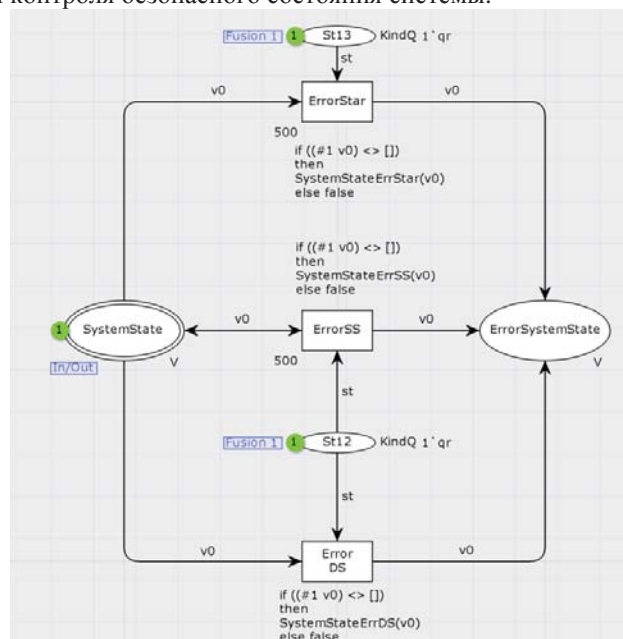


Рис. 5. Сеть Петри, моделирующая контроль текущего состояния системы

Позиция “System State” на рисунке 5 моделирует текущее состояние системы по своей сути является позицией “SystemStateMain” из сети Петри, изображенной на рисунке 1. Позиция “ErrorSystemState” отображает нарушение безопасного состояния системы при текущих доступах и в случае корректного функционирования системы остаётся всегда пустой.

Переходы “ErrorStar”, “ErrorSS”, “Error DS” моделируют нарушение свойств безопасности в текущих доступах.

Анализ модели

При исследовании модели применяется анализ пространства состояний. [20], [21] Поскольку известной проблемой в сетях Петри является комбинаторный взрыв при большой начальной маркировке внесены ограничения для модели. Начальная маркировка, а следовательно входные данные, формировались с учетом следующих ограничений:

- Исследовались свойства сохранности правил «Простой безопасности» и «*-правила» при изменении состояния системы.
- Множество субъектов ограничено одним элементом.
- Для множества доступов проводились исследования на одном, двух и трёх видах доступа.

При анализе пространства состояний использовались штатные средства моделирования.

Для одного вида доступа получено полное пространство состояния модели, насчитывающее 71619 узлов, из них конечными являлись 41423 узла. На основе автоматизированного анализа конечных узлов пространства состояний обнаружено 2372 конечных узла с нарушениями. Наличие нарушения определялось на основе итоговой маркировки позиции “ErrorSystemState”. В корректно работающей системе данная позиция остаётся с пустой маркировкой, что говорит о сохранности безопасного состояния системы и корректности работы сформулированных в классической модели правил.

На рисунке 6 изображена одна из траекторий, приводящая к состоянию системы, нарушающему условия безопасности. Снизу под траекторией представлено описание некоторых дуг пространства состояний (.При) при этом полем 1 обозначена информация о связи узлов, в поле 2 – переход, создавший изменения в состоянии, а полем 3 изменения, вносимые в маркировку сети.

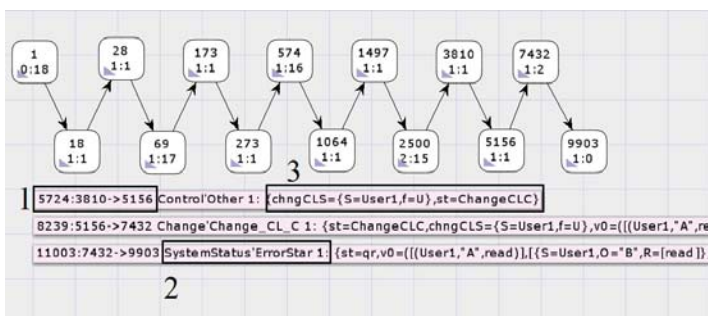


Рис. 6. Траектория нарушения условий безопасности

Каждый узел содержит информацию о текущем состоянии системы и средствами среды моделирования возможно воспроизвести любое из имевших место состояний в симулятор для дальнейшего исследования событий, вызвавших нарушения. Например, при анализе в симуляторе узла 7432, предпоследнего узла на рисунке 6, активными являются переходы “ErrorStar” и “ErrorSS”, что говорит о наличии запрещенных доступов и, следовательно, потоков информации.

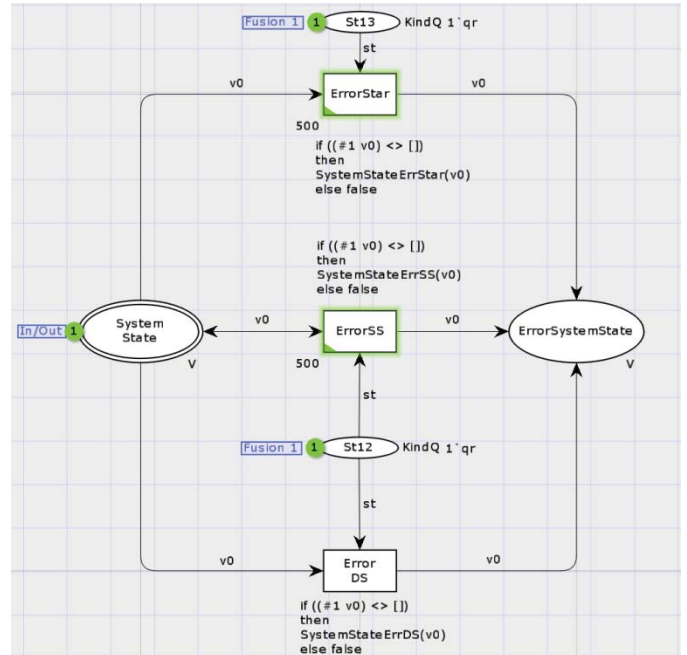
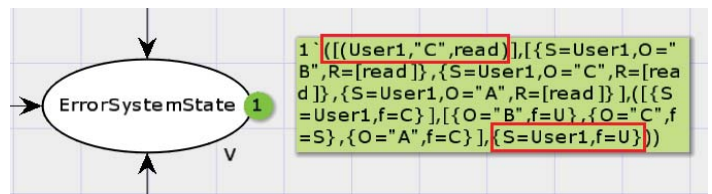
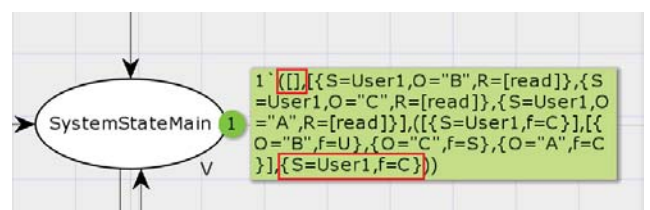


Рис. 7. Маркировка подсети для 7432 узла пространства состояний

Для подробного изучения модели в процессе симуляций просматриваются текущие значения маркеров в позициях. На рисунке 8 изображена позиция “ErrorSystemState” с отображением конечной маркировки, моделирующей состояние системы с нарушением, и позиции “SystemStateMain” с начальной маркировкой.



а) Конечное состояние системы, нарушающее условия безопасности



б) Конечное состояние системы

Рис. 8. Визуализация содержания маркеров

Виды симуляции, реализованные в среде моделирования, позволяют проводить пошаговую симуляцию без выбора маркеров, проходящих через переход сети Петри, и с выбором маркера для более подробного изучения влияния частных маркировок. Также реализована автоматическая симуляция заданного числа шагов с отображением каждого шага моделирования и без отображения с выводом итоговой маркировки. Описанные инструменты позволяют наглядно оценить траектории, приводящие к нарушениям исследуемых свойств. Сформировать недопустимые траектории и условия их возникновения.

При анализе траектории некорректного функционирования определяются необходимые изменения, дополняющие модель и устраняющие некорректные траектории в пространстве состояний. В данном примере, нарушения происходят при изменении уровня конфиденциальности и неиз-

менности текущих доступов, что является известной проблемой классической модели. Для устранения данной проблемы существует несколько вариантов описанных в [22][23].

Для контроля событий, приводящих к нарушению свойств «Простой безопасности» и «*-правила», подсеть Петри, изображенная на рисунке 3 дополнена переходом и представлена на рисунке 9. Переход “AdditionalChecks” осуществляет контроль изменений, содержащихся в запросе на корректность относительно существующих доступов.

Исследование модели для двух и трех видов доступа при неизменности сети Петри привело к обнаружению аналогичных траекторий некорректного функционирования. Изменение модели, представленное на рисунке 9, привело к их устранению.

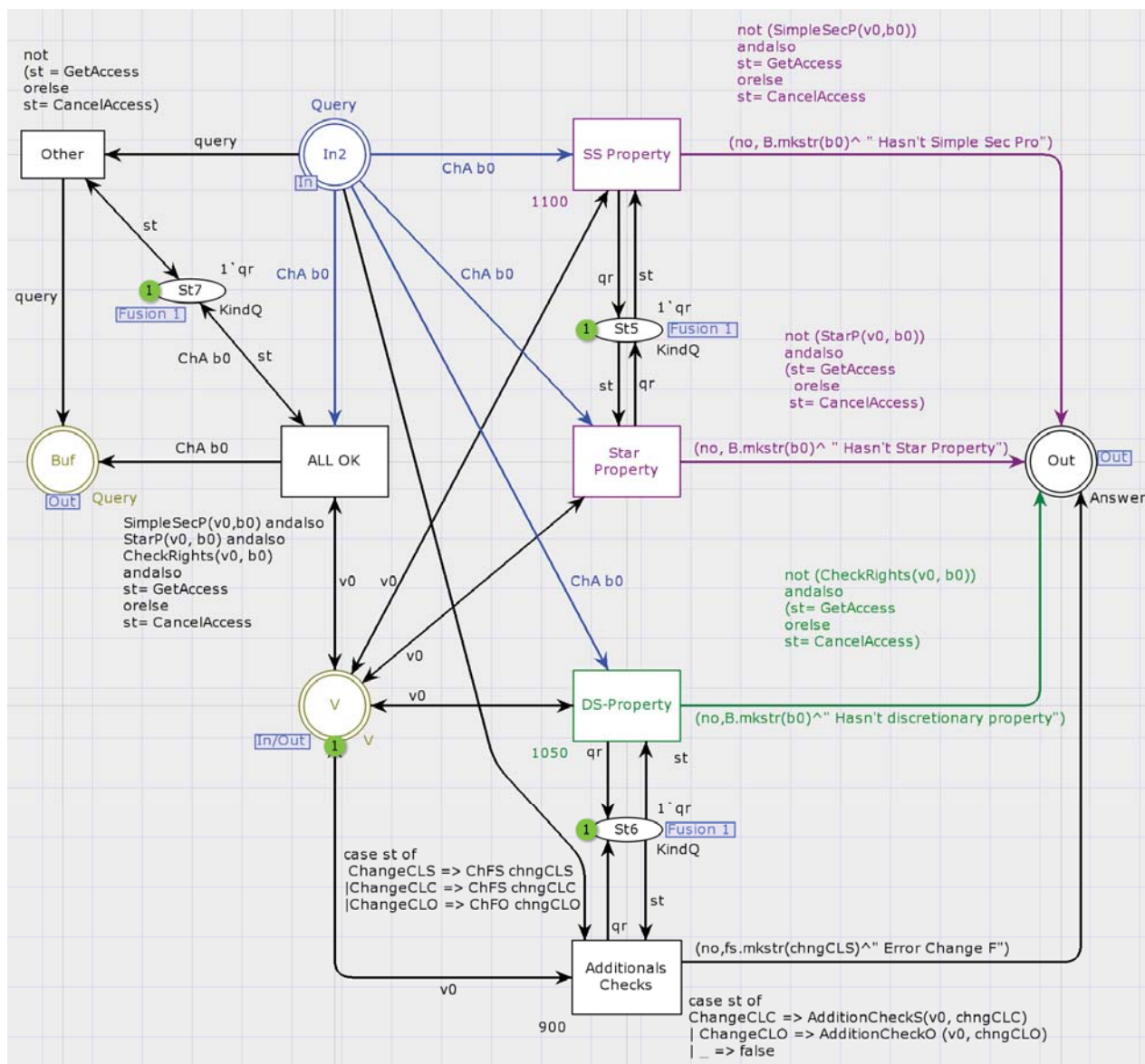


Рис. 9. Дополнения сети Петри для устранения некорректного функционирования

При построении пространства состояний для трех видов доступа было рассчитано 260713 узлов. Данное пространство состояний является частичным в соответствии с отчетом среды моделирования, что подтверждается исследованием. Из 260713 узлов конечными являлись 210428 узлов, а приводящими к некоренным состояниям 2500, что говорит о построении неполного пространства состояний. Построение неполного пространства является ограничением среды, для устранения которого, разрабатываются вспомогательные механизмы. Интеграция дополнительных средств анализа является одним из возможностей среды моделирования CPN Tools [24].

Одним из способов устранения комбинаторного взрыва является изменение уровня абстракции модели и уменьшению размерности начальной маркировки. Для примера возможностей моделирования, использованных в подходе, выбран подробный уровень абстракции с моделированием отдельных элементов множеств объектов и субъектов.

Помимо исследования полного пространства состояний [25] с последующей симуляцией в среде моделирования реализован механизм формальной верификации методом “Model Checking” с использованием ASK-CTL логики. Дополнение разработанного подхода использованием ASK-CTL логики и построение полного пространства состояний для сложных многоуровневых моделей является целью дальнейших исследований.

Заключение

Разработан подход к моделированию различных систем с использованием раскрашенных сетей Петри. На примере классической модели мандатного управления доступом продемонстрирован анализ информационной системы. Проведенный анализ позволил выявить известный недостаток модели Белла-Лаппадула, состоящий в возможности понизить уровень конфиденциальности без изменения множества текущих доступов, что подтверждает результативность предложенного подхода, и позволяет обоснованно сформировать компенсирующие меры для устранения обнаруженного некорректного функционирования.

Разработанная модель обладает структурной, логической и динамической эквивалентностью относительно исследуемого проекта информационной системы. Используемые в подходе методы и средства позволяют быстро вносить изменения в модель, обладают наглядностью и минимально достаточным набором примитивов, что облегчает процесс моделирования и изучения результатов.

Планируется адаптировать представленный подход для анализа более сложных свойств ИС, а также для автоматизации этапов поиска скрытых каналов. Для исследования больших (более 10 млн.) пространств состояний разрабатывается программное средство, дополняющее среду моделирования CPN Tools.

Литература

1. *Кориунов Г.И., Липатников В.А., Шевченко А.А., Малышев Б.Ю.* Метод адаптивного управления защитой информационно-вычислительных сетей на основе анализа динамики действий нарушителя // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 61-72. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72
2. *Липатников В.А., Костарев С.В., Шевченко А.А.* Способ контроля уязвимостей информационно-вычислительных сетей критических инфраструктур // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы IV межрегиональной научно-практической конференции, Севастополь, 18-22 сентября 2018 года / Севастопольский государственный университет; науч. ред. Б.В. Соколов. Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2018. С. 255-256.
3. *Грушо А.А., Грушо Н.А., Тимонина Е.Е., Шоргин С.Я.* Архитектурные уязвимости распределенных информационно-вычислительных систем // Системы и средства информатики. 2016. Т. 26. № 3. С. 74-82. doi:10.14357/08696527160305
4. *Новиков В.А., Тихонов В.А.* Подход к моделированию перспективных информационных систем на основе аппарата цветных сетей Петри // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность» : Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 21-22 апреля 2021 года. Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2021. С. 129-138.
5. *Jensen, K., Kristensen, L.M., Wells, L.* Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. Int J Softw Tools Technol Transfer. 2007. №9, pp. 213-254. doi:10.1007/s10009-007-0038-x
6. *Wang J., Teufelhart W.* Formal Methods in Computer Science (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. 2019. doi:10.1201/9780429184185
7. *Петров А.Ю., Оленев В.Л.* Формальные методики исследования характеристик функционирования сетей // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии : Сборник докладов Второй Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14-22 апреля 2021 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 309-316.
8. *Девянин П.Н., Кулямин В.В., Петренко А.К., Хорошилов А.В., Щепетков И.В.* Интеграция мандатного и ролевого управления доступом и мандатного контроля целостности в верифицированной иерархической модели безопасности операционной системы. Труды Института системного программирования РАН. 2020;32(1):7-26. doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(1)-1
9. *Бирюков М.А., Зибров О.П., Саенко И.Б.* Способ реализации мандатной модели управления доступом на базе ролевой модели // Региональная информатика и информационная безопасность, Санкт-Петербург, 01-03 ноября 2017 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургское Общество информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2017. С. 48-50.
10. *Окорочков В.А., Лащук Д.Е.* Применение схемы многоуровневого доступа для организации защиты конфиденциальных данных // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. 2021. № 2(40). С. 22-30. doi:10.14529/secur210203

11. CPN Tools A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cpntools.org/>, (дата обращения 21.09.21).
12. Liu Z., Liu J. Formal Verification of Blockchain Smart Contract Based on Colored Petri Net Models // 2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2019, pp. 555-560. doi:10.1109/COMPSAC.2019.10265
13. Лесняк Д.А., Матвеев С.А. Моделирование комплекса средств защиты информации радиоканалов временными раскрашенными сетями Петри // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2020. № 1(75). С. 127-130.
14. Бацких А.В. Имитационная модель процесса функционирования модифицированной подсистемы управления доступом системы защиты информации от несанкционированного доступа в программном окружении CPN TOOLS // Вестник ВИ МВД России. 2020. №3.
15. Farah K., Chabir K., Abdelkrim M.N. Colored Petri nets for modeling of networked control systems // 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 2019, pp. 226-230. doi:10.1109/STA.2019.8717215
16. Jensen K., Kristensen L.M. Hierarchical Coloured Petri Nets. In: Coloured Petri Nets. 2009. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/b95112_5
17. Гаврилова А.С. Сети Петри как инструмент моделирования параллельных процессов // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении : IV Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием). Посвящается 75-летию Гуманитарно-педагогической академии (филиал) ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского» в г. Ялте, Ялта, 21-23 мая 2019 года / отв. редактор К.А. Маковейчук. – Ялта: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2019. С. 69-73.
18. Noori N.S. Modeling the escalation/de-escalation of response operation levels in disaster response networks using hierarchical Colored Petri Nets (CPN) approach // Annual IEEE International Systems Conference (SysCon), 2018, pp. 1-8, doi:10.1109/SYSCON.2018.8369593.
19. Blaga F., Blaga P., Vesselenyi T., Hule V., Indre C. Modeling with hierarchical colored Petri nets. Case study // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. doi:10.1088/1757-899X/898/1/012017
20. Jensen K., Kristensen L.M. Formal Definition of State Spaces and Behavioural Properties. In: Coloured Petri Nets. 2009. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/b95112_9
21. Большчев М.В., Мирошниченко Е.Л., Пасечник Р.М. Алгоритм построения диаграммы достижимости модели состояния работоспособности информационной системы // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 6(34). С. 79-91. doi:10.21681/2311-3456-2019-6-79-91
22. Девянин П.Н., Кулямин В.В., Петренко А.К. и др. Моделирование и верификация политик безопасности управления доступом в операционных системах. М.: Горячая линия-Телеком, 2019. 214 с.
23. Kashmar N., Adda M., Atieh M., Ibrahim H. Access Control Metamodel for Policy Specification and Enforcement: From Conception to Formalization, // Procedia Computer Science (2021), pp. 887-892. doi: 10.1016/j.procs.2021.03.111
24. Карраскель Х.С., Моралес А., Виллаполь М.Е. Prosega/CPN: расширение CPN Tools для автоматного анализа и верификации систем. Труды Института системного программирования РАН. 2018;30(4):107-128. doi:10.15514/ISPRAS-2018-30(4)-7
25. Best E., Devillers R. Characterisation of the state spaces of marked graph Petri nets // Information and Computation. 2017, vol. 253, Part 3, pp. 399-410. doi: doi.org/10.1016/j.ic.2016.06.006

VERIFICATION OF ACCESS CONTROL SYSTEMS BASED ON MODELING WITH COLORED PETRI NETS

VALERY A. TIKHONOV

St. Petersburg, Russia v.tihonov@ao-trk.ru

VLADIMIR A. NOVIKOV

St. Petersburg, Russia, v.novikov@ao-trk.ru

KEYWORDS: formal verification, information security, colored Petri net, modelling, compliance assessment.

ABSTRACT

Introduction: the complexity of the information systems (IS) being developed increases the requirements for the error-free design of the access control system and increases the likelihood of the presence and impact of vulnerabilities on the state of information security. Formal verification of the IS project at the development stage allows minimizing the appearance of architectural vulnerabilities. Changes carried out by regulators in the field of certification of information security means actualizing issues related to the development and analysis of formal models. **Purpose:** development of an approach to the construction and formal verification of models that has an intuitively, completeness presentation and effective analysis. **Methods:** construction of models by the mathematical apparatus of colored Petri nets in the CPN Tools modeling environment with the subsequent study of the properties of the net. **Results:** an approach has been developed that has structural, logical and dynamic completeness.

The clarity of the models developed using the presented approach reduces the time for detecting incorrect functioning and developing compensatory measures with the subsequent confirmation of their effectiveness. The analyze of the state space showed the need to supplement the modeling environment for the complete construction of the state space in the case of complex models and a large number of markers during the initial marking of the Petri net. **Practical relevance:** the developed approach is proposed to be used for formal verification of access control models and filtering information flows in the certification procedure for information security tools. The versatility and simplicity of the approach allows you to implement the formal verification procedure in the development stages of various kinds of systems. **Development prospects:** development of additional software that allows building a complete state space for complex models, as well as complementing the method with approaches using ASK-CTL logic.

REFERENCES

1. G.I. Korshunov, V.A. Lipatnikov, A.A. Shevchenko, B.Y. Malyshev (2018). Adaptive Management of Information Network Protection with Analysis of Intruder's Actions. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], no. 4, pp. 61-72 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72
2. V. A. Lipatnikov, S.V. Kostarev, A. A. Shevchenko (2018). Method of controlling sensibilities of computer networks of critical infrastructure. *Advanced national information systems and technologies Materials of IV interregional scientific-practical conference Sevastopol*, September 18-22, pp. 255-256. (In Russian)
3. A.A. Grusho, H.A. Grusho, E.E. Timonina, S.Ya. Shorgin. (2016). Architectural vulnerabilities of distributed information systems. *Systems and means of informatics. МЦДЮ*. 26. No. 3, pp. 74-82. doi:10.14357/08696527160305 (In Russian)
4. V.A. Novikov, V.A. Tikhonov (2021). An approach to modeling advanced information systems based on the apparatus of color Petri nets. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremen-*

- noy nauki po napravleniyu "Informatsionnaya bezopasnost'" : Sbornik statey III Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Anapa, 21-22 april 2021. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voennyi innovatsionnyy tekhnopolis "ERA", pp. 129-138. (In Russian)
5. K. Jensen, L.M. Kristensen, L. Wells. (2007). Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. *Int J Softw Tools Technol Transfer*. No. 9, pp. 213-254. doi:10.1007/s10009-007-0038-x
6. J. Wang, W. Tepfenhart (2019). Formal Methods in Computer Science (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. doi:10.1201/9780429184185
7. A.U. Petrov, V.L. Olenev. (2021). Formal methods of research the characteristics of network functioning. *Ajerokosmicheskoe priborostroenie i jekspluatacionnye tehnologii : Sbornik dokladov Vtoroj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*, Sankt-Peterburg, 14-22 april 2021. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet ajerokosmicheskogo priborostroenija, pp. 309-316.



8. P.N. Devyanin, V.V. Kulyamin, A.K. Petrenko, A.V. Khoroshilov, I.V. Shchepetkov. (2020). Integrating RBAC, MIC, and MLS in Verified Hierarchical Security Model for Operating System. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. No. 32(1), pp. 7-26. (In Russian). doi:10.15514/ISPRAS-2020-32(1)-1
9. M. Biryukov, O. Zibrov, I. Saenko. (2017). The method of mandatory access control implementation by role-based access control facilities. *Regional'naja informatika i informacionnaja bezopasnost'*, Sankt-Peterburg, 01-03 november 2017. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskoe Obshhestvo informatiki, vychislitel'noj tehniki, sistem svjazi i upravlenija, pp. 48-50. (In Russian)
10. V.A. Okorokov, D.E. Laschuk. (2021). Application of a multi-level access scheme for protecting confidential data. *Bulletin of the Ural Federal District. Security in the Information Sphere*. No. 2(40), pp. 22-30. doi:10.14529/secur210203
11. CPN Tools A tool for editing, simulating, and analyzing Colored Petri nets.
12. Z. Liu and J. Liu. (2019). Formal Verification of Blockchain Smart Contract Based on Colored Petri Net Models," *2019 IEEE 43rd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, pp. 555-560, doi:10.1109/COMPSAC.2019.10265
13. D.A. Lesnyak, S.A. Matveev. (2020). Modelirovanie kompleksa sredstv zashchity informatsii radiokanalov vremennymi raskrashennymi setyami Petri. *SPbNTORES: trudy ezhegodnoy NTK*. No. 1(75), pp. 127-130. (In Russian)
14. A.V. Batskikh (2020). Simulation model of the functioning of the modified access control subsystem of the information protection system against unauthorized access in the cpn tools software environment. *Vestnik of voronezh institute of the ministry of interior of Russia*. No.3. (In Russian)
15. K. Farah, K. Chabir and M.N. Abdelkrim (2019). Colored Petri nets for modeling of networked control systems. *2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 226-230, doi:0.1109/STA.2019.8717215
16. K. Jensen, L.M. Kristensen (2009). Hierarchical Coloured Petri Nets. In: *Coloured Petri Nets*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/b95112_5
17. A. S. Gavrilova (2019). Seti Petri kak instrument modelirovaniya parallel'nyh processov. *Informacionnye sistemy i tehnologii v modelirovanii i upravlenii : IV Vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija (s mezhdunarodnym uchastiem)*. Posvjashhaetsja 75-letiju Gumanitarno-pedagogicheskoy akademii (filial) FGAOU VO "KFU im. V.I. Vernadskogo" v g. Jalte, Jalta, 21-23 May 2019, editor K.A. Makovejchuk. Jalta: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "Izdatel'stvo Tipografija "Arial", pp. 69-73. (In Russian)
18. Noori N.S. (2018). Modeling the escalation/de-escalation of response operation levels in disaster response networks using hierarchical Colored Petri Nets (CPN) approach. *Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, pp. 1-8, doi:0.1109/SYSCON.2018.8369593
19. F. Blaga, P. Blaga, T. Vesselenyi, V. Hule, C. Indre (2020). Modeling with hierarchical colored Petri nets. Case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/898/1/012017
20. K. Jensen, L.M. Kristensen (2009). Formal Definition of State Spaces and Behavioural Properties. In: *Coloured Petri Nets*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/b95112_9
21. Maxim Bolychev, Evgeniy Miroshnichenko, Rodion Pasechnik (2019). Algorithm for Creating the Model of Attainability of Information System Operability Status Model. *Voprosy kiberbezopasnosti*, pp. 79-91. 10.21681/2311-3456-2019-6-79-91 (In Russian)
22. P.N. Devyanin, V.V. Kulyamin, A.K. Petrenko ets. (2019). Modelirovanie i verifikatsiya politik bezopasnosti upravleniya dostupom v operatsionnykh sistemakh. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 214 p.
23. Nadine Kashmar, Mehdi Adda, Mirna Atieh, Hussein Ibrahim (2021). Access Control Metamodel for Policy Specification and Enforcement: From Conception to Formalization. *Procedia Computer Science*, pp. 887-892. doi:10.1016/j.procs.2021.03.111
24. Kh.C. Carrasquel, A. Morales, M.E. Villapol. (2018). Prosega/CPN: An Extension of CPN Tools for Automata-based Analysis and System Verification. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS (Proceedings of ISP RAS)*. No. 30(4), pp. 107-128. doi:10.15514/ISPRAS-2018-30(4)-7
25. Eike Best, Raymond Devillers (2017). Characterisation of the state spaces of marked graph Petri nets. *Information and Computation*, vol. 253, Part 3, pp. 399-410 .doi:10.1016/j.ic.2016.06.006

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Tikhonov V.A., engineer researcher JSC "Radiomonitoring technologies"

Novikov V.A., PhD. Head of the test center JSC "Radiomonitoring technologies"

doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-60-68

ИНТЕГРАЦИЯ СРЕДСТВ АНАЛИЗА И ИСПОЛНЕНИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ БЛОЧНОГО ПОДХОДА

ВАСИЛЬЕВ

Николай Владимирович¹

ЯШИН

Александр Иванович²

ДОВЖИКОВ

Сергей Николаевич³

АННОТАЦИЯ

Введение: ядром современных информационных систем управления предприятием являются машины исполнения бизнес процессов. Подавляющее их большинство используют язык описания BPMN2 (например JBPM, Activiti, Camunda). Несмотря на принятие стандарта, поддержка BPMN редакторами платформо-ориентирована и обладает ограниченными возможностями по переносу описания. Для создания и поддержания BPMN описаний в актуальном состоянии бизнес-аналитик помимо редакторов использует целый набор вспомогательных инструментов, включающих средства верификации (например WoPeD) и анализа производительности (Bizagi, BIMP). Свои особенности вносит привлечение для выявления и актуализации бизнес-процессов методологии глубинного анализа процессов (ProcessMining), использующей свой набор инструментов (Disco, ProM), поддержка BPMN в которых ограничена. Как следствие интеграция инструментов анализа и средств исполнения бизнес-процессов остается недостаточной, что существенно замедляет внедрение и актуализацию систем управления предприятием. **Цель исследования:** на базе общей методологии обработки журналов, используемой Process Mining, показать, что блочно-структурированный подход на основе деревьев процессов может быть универсальным формализмом на всех этапах (реконструкция, анализ качества, анализ временных и стоимостных параметров). **Методы:** теория сетей Петри, дискретная математика, математическая логика, теория алгоритмов. **Результаты:** описана схема интегрированного анализа бизнес-процессов. Предложена и реализована модель динамики деревьев, которая является основой для реализации машины исполнения бизнес-процессов. На основе модели динамики предложен алгоритм построения графа достижимости маркировок дерева процессов. Модифицированы алгоритмы оценки соответствия и точности для их применения с деревьями процессов. В рамках методологии аналитической оценки параметров производительности блочных бизнес-процессов получена формула оценки времени завершения циклического блока с несколькими вариантами доработки. Произведено экспериментальное исследование эффективности разработанного решения путем натурального моделирования схемы интегрированного анализа и предложенных методов и его сравнение с промышленными инструментами (pm4py) по критериям точности и соответствия реконструкции. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о соизмеримых с известными инструментами характеристиках. Это позволяет уменьшить необходимость использования внешних инструментов, повышая оперативность внесения изменений. **Практическая значимость:** приведенные в работе идеи были реализованы в разработанной авторами виртуальной машине Onegine и прошли апробацию в ряде опытных конструкторских работ. Описанные в работе результаты могут служить основой для создания более эффективных систем управления предприятием.

Сведения об авторах:

¹ к.т.н., начальник сектора, ПАО "Интелтех", г. Санкт-Петербург, Россия, gandvik1984@gmail.com

² д.т.н., советник генерального директора ПАО "Интелтех", г. Санкт-Петербург, Россия, a_yashin@inbox.ru

³ инженер, ПАО "Интелтех", г. Санкт-Петербург, Россия, sergei.dovzhikov@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревья процессов, верификация, машины исполнения бизнес-процессов, сети Петри, производительность бизнес-процессов.

Для цитирования: Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н. Интеграция средств анализа и исполнения бизнес-процессов на основе блочного подхода // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 60-68. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-60-68

Введение

Платформы корпоративных информационных систем, примерами которых являются СЭД и ERP – системы, обладают развитыми инструментами адаптации к особенностям объектов автоматизации. Модификация прикладной логики этих систем обычно осуществляется через описываемые в графической нотации BPMN бизнес-процессы. Методологически [1, 2] создание схем бизнес-процессов осуществляется посредством формализации нормативных документов и опроса сотрудников на рабочих местах. Полученное описание опционально подвергается имитационному моделированию и развертывается в корпоративной информационной системе. На последующих этапах оптимизации и внедрения бизнес-процессы часто требуют многочисленных уточнений. Задача осложняется тем, что поддержка BPMN в инструментах часто неполная и перенос описаний между инструментами проектирования, моделирования и исполнения затруднен. Как следствие, аналитик при исследовании и развертывании бизнес-процесса вынужден создавать специфические версии одной и той же модели.

Привлечение методологии глубинного анализа процессов (process mining) позволяют повысить эффективность создания бизнес-процессов [3, 4]. Методология предполагает, что на предприятии ставится система с минимально необходимым набором процессов. Пользователи выполняют в системе привычные действия с минимальной долей автоматизации, фактически в ручном режиме. Действия пользователей заносятся в журналы информационных систем, обработав которые аналитик может принять рациональное решение об организации бизнес-процесса.

Но и в данной методологии вновь имеет место многообразие моделей, специфичных для различных алгоритмов (например, D/F – графы процессов, сети Петри, нечеткие схемы). Как результат бизнес-аналитик должен и в этом случае выполнять значительное количество ручных операций по преобразованию моделей.

Ключ к решению описанных трудностей [5], [6] – унификация моделей анализа и исполнения бизнес-процессов. Перспективно [7] применение высокоуровневого блочно-структурированного подхода к описанию на основе деревьев процессов. За счет простоты и корректности на уровне синтаксиса, данный подход может служить единым формализмом, связывающим основные этапы жизненного цикла бизнес-процессов.

Данная работа посвящена решению некоторых прикладных и теоретических вопросов, обеспечивающих практическую реализуемость сквозного подхода к описанию, анализу и исполнению бизнес-процессов, задаваемых при помощи деревьев. Описываемые подходы были реализованы в ряде изделий. В работе описывается модифицированная авторами схема интегрированного анализа и исполнения бизнес-процессов. Для формализации исполнения предложена модель динамики деревьев процессов. Далее приведены и обоснованы модифицированные авторами алгоритмы оценки соответствия и точности реконструированного дерева. В следующих разделах приводится полученная авторами методика прогнозирования времени выполнения процессов.

В конце работы приведены результаты натурального моделирования и сравнение результатов реконструкции с существующими инструментами process mining (pm4py) на основе метрик точности и соответствия.

Схема интегрированного анализа процессов

В работе для реконструкции схем высокоуровневых процессов используется журнал выполнения уже развернутых в информационной системе элементарных (базовых) процессов. Например, в системах электронного документооборота базовыми действиями будут подписание документа цифровой подписью, создание дочернего поручения, просмотр документа, вынесение резолюции и пр. Базовые процессы ассоциированы с определенным типом объектов и состоят из единственного действия изменения состояния объекта, характеризуются ролью исполнителя и набором вспомогательных атрибутов, отображаемых на форме. Общая схема интегрированного анализа представлена на рис. 1. За счет выделения относительно неизменной модели элементарных операций, такой подход позволяет произвести оперативное изменение развернутых в корпоративной информационной системе бизнес-процессов, которыми для приведенного примера электронного документооборота будут маршруты движения документов в организации. По мере заполнения журнала элементарными действиями становится возможно средствами Process Mining исследовать логику их связей в процессе выполнения. Как только развернутый бизнес-процесс перестает удовлетворять потребностям организации, пользователи вновь переходят к базовым действиям и процесс реконструкции повторяется.

В корпоративных информационных системах каждый тип объектов (вид документа, запись справочника и пр.) характеризуется своим набором специфичных бизнес-процессов. Поэтому возможно разбиение общесистемного журнала по типам объектов (далее назовем его объектом-селектором).



Рис. 1. Схема интегрированного анализа процессов

Каждый объект-селектор характеризуется *жизненным циклом*, который описывает его поведение от момента создания до уничтожения. Жизненный цикл может быть описан в форме графа, в котором вершинами являются стадии, а ребрами – переходы между стадиями.

В предлагаемом подходе реконструируется единая схема бизнес-процесса, отражающая все стадии жизненного цикла объекта-селектора от создания до уничтожения. Задача разбиения единой схемы процесса на подпроцессы ложится на аналитика. Методологически удобной является декомпозиция дерева процесса по стадиям жизненного цикла объектов-селекторов. Точность и соответствие модели (см. раздел 4) процесса также удобнее оценивать сразу для всего дерева поведения объекта-селектора. Указанные интегральные характеристики позволяют осуществлять непрерывный мониторинг периодически формируемого журнала и эксплуатируемой совокупности бизнес-процессов.

Оценка временных характеристик созданных процессов (см. раздел 4) выполняется на последнем этапе, так как не влияет на процесс реконструкции и имеет значение при оптимизации логики и прогнозировании сроков завершения экземпляров бизнес-процессов.

Как было указано, для заполнения журнала в реализованной авторами машине исполнения Onegine [7] выделяется специальный вид базовых бизнес-процессов. Реконструкция модели процесса была осуществлена алгоритмом InductiveMiner [8-10]. В разделе 2 описывается модель динамики деревьев процессов, используемая в разделе 3 для модификации алгоритмов структурной оценки качества реконструкции. Приведенный в следующем разделе формализм также используется в разделе 4 при декомпозиции модели процесса для оценки времени выполнения.

Модель динамики деревьев процессов

Логической основой для BPMN является подкласс сетей Петри, носящих название WF-сетей [1, 2]. Как и в случае сетей Петри, BPMN не боится от возможных ошибок: тупиков, активных блокировок и мертвых переходов.

Интуитивное свойство корректности процесса, выражающееся в том, что бизнес-процесс должен стартовать с одним маркером в начальном состоянии, заканчиваться одним маркером в последнем состоянии и не содержать неисполняемых элементов составляют суть концепции бездефектности [1, 2].

Проблема возможности внесения разработчиками логических ошибок разрешается при блочно-структурированном задании бизнес-процесса в виде дерева. Данный подход, рассмотренный в работах [8-10], позволяет создавать гарантированно бездефектное описание. Однако деревья процессов пока используются главным образом в алгоритмах ProcessMining. Применение этого подхода в машинах исполнения, а также на этапе оценки адекватности исполняемого бизнес-процесса требует разработки более специфичной, чем в сетях Петри модели динамики. Требуется выработать правила срабатывания дерева процессов, а также модифицировать основные понятия и методы анализа, сформулированные для сетей Петри [11].

Теоретические основы формализма деревьев процессов следуют из доказанной теоремы [1] о том, что любой бездефектный процесс можно разбить на блоки, каждый из которых имеет на входе и выходе один маркер. Если каждый из таких блоков бездефектен, то их можно объединить при по-

мощи операторов в процесс более высокого уровня. Формализм дополняет параллельный (\wedge) и условный (\times) операторы композиции блоков циклическим ($@$) и последовательным (\rightarrow) способами. Листовыми узлами дерева являются выполняемые действия.

Заметим, что исходя из теоремы о бездефектности блочно-структурированных процессов [1,2], между родительским и дочерним узлом всегда будет передаваться только один маркер. То есть любой узел как формальное представление блока получает от родительского узла единственный маркер. После выполнения собственных дочерних узлов, маркер передается обратно в родительский узел. Перемещение маркера по поддеревьям в зависимости от типа узла показано на рисунке 2.

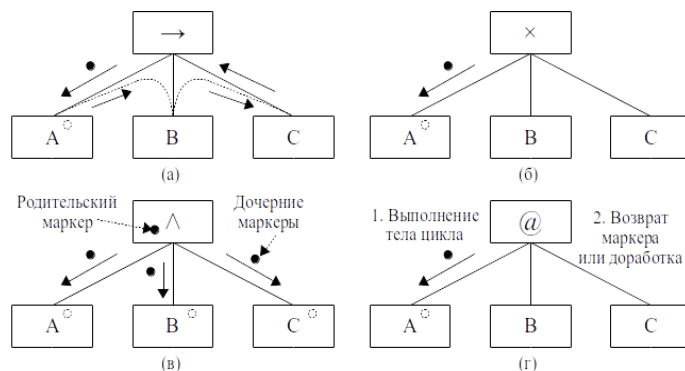


Рис. 2. Обход маркерами поддеревьев последовательного (\rightarrow), условного(\times), параллельного (\wedge) и циклического ($@$) узлов

В случае последовательного узла (\rightarrow) единственный маркер поочередно передается в поддеревья, соответствующие дочерним узлам. Такое исполнение соответствует обходу в глубину. В условном узле (\times) единственный маркер передается в выбранное дочернее поддерево. При входе маркера в узел параллельного выполнения (\wedge) происходит создание дочерних маркеров, каждый из которых передается в соответствующее поддерево. Исходный (родительский) маркер ожидает момента возврата маркеров от дочерних поддеревьев. После получения маркеров от всех дочерних поддеревьев происходит их уничтожение, а родительский маркер передается узлу-предку.

Указанную схему синхронизации можно упростить учитывая бездефектность дерева процессов. Будем считать, что маркер передается из параллельного узла в родительский в случае, если от дочернего узла был получен маркер, а в других узлах-потомках больше не осталось маркеров. Узел циклического выполнения ($@$) содержит тело цикла A, возможный вариант доработки конечного результата B и выход из цикла C. При обходе единственный маркер передается в первое по порядку поддерево. После его завершения поведение, фактически, аналогично исключающему узлу с поддеревьями C и B. В случае доработки маркер передается в соответствующее поддерево. По его возвращению, маркер снова передается в первое поддерево. После чего снова производится исключающий выбор между завершением или доработкой.

В процессе функционирования маркеры могут «останавливаться» только в листовых узлах, ожидая завершения дей-

ствия. Таким образом состояние процесса можно описать расположением маркеров в дочерних узлах. Будем обозначать листовые узлы дерева как p_1, p_2, \dots, p_n .

Маркировкой дерева назовем вектор вида (p_1, p_2, \dots, p_n) . Элемент p_i этого вектора указывает на присутствие маркера в узле (0 или 1). Иными словами, маркировка дерева - функция $M(p)$, сопоставляющая каждому листовому узлу дерева p число находящихся в нем маркеров:

$$M(p): P \rightarrow \{0,1\}$$

Листовой узел p *маркирован (marked)*, если содержит маркер. Маркированный узел может сработать, вызывая смену маркировки. Сработавший в маркировке M_1 листовой узел a порождает множество новых маркировок $\{M_i\}$ перемещая маркеры между листовыми узлами. В случае узлов последовательного (\rightarrow) и параллельного (\wedge) операторов множество $\{M_i\}$ будет состоять из единственной маркировки, в то время как при срабатывании условного (\times) и циклического ($@$) узлов число порождаемых маркировок будет равно числу дочерних поддеревьев. Маркировки, входящие в множество $\{M_i\}$, будем называть «сцепленными».

Будем обозначать этот факт как $M_1 \xrightarrow{a} \{M_i\}$. Будем считать, что маркеры между узлами перемещаются мгновенно и в один и тот же момент времени может сработать только один листовой узел.

Можно выделить 4 состояния листового узла: не содержит маркера и не получает его в такте (неактивный), получает маркер в такте (активация), отдает маркер в родительский узел (срабатывание), пропускает срабатывание в такте (ожидание).

Таким образом, можно считать дерево процессов (без листовых узлов) «оператором», перемещающим маркеры между листовыми узлами. Динамику дерева процессов удобно описать в форме графа достижимости маркировок, в котором вершинами являются маркировки, а переходами – сработавшие действия листовых узлов. Формально, алгоритм графа достижимости маркировок может быть описан следующим образом:

PT – REACHABILITY – GRAPH

1 $(V, E, v_0) := (\{M_0\}, \emptyset, M_0)$;

2 $Work := \{M_0\}$;

3 **while** $Work \neq \emptyset$

4 **do** выбрать M из $Work$;

5 $Work := Work \setminus \{M\}$;

6 **for** $a \in enabled(M)$

7 **do** $\{M'_i\} := fire(M, a)$;

8 **for** $M'_i \in \{M'_i\}$

9 **do if** $M'_i \notin V$ then $V := V \cup M'_i$;

10 $Work := Work \cup M'_i$;

11 $E := E \cup \{(M, a, M'_i)\}$;

12 **return** (V, E, v_0)

В псевдокоде $enabled(M)$ – множество листовых узлов (действий), которые могут сработать в маркировке M . $fire(M, a)$ – функция, приводящая к смене маркировке при выполнении листового узла a .

Алгоритм, за исключением упомянутого недетерминизма условного и циклического шлюзов, аналогичен алгоритму построения графа достижимости сети Петри [2]. Однако, в отличие от последнего всегда корректно завершается вследствие ограниченности описываемых деревьями процессов (вытекает из теоремы о бездефектности) [1-3]. Пример дерева процессов и графа маркировок показан на рисунке 3.

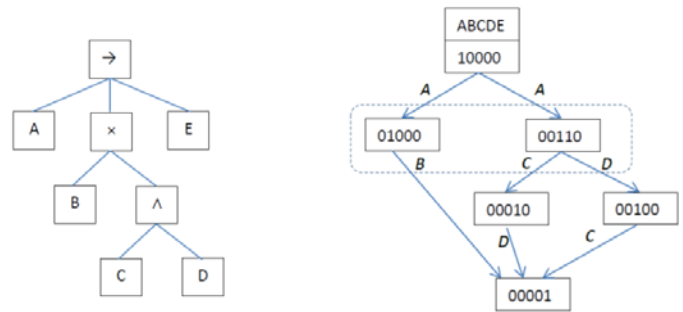


Рис. 3. Схема дерева процессов и его граф достижимости маркировок. Пунктиром показано множество «сцепленных» маркировок

В разработанном прототипе для реконструкции схемы процесса был использован алгоритм InductiveMiner [8]. Следующий раздел посвящен оценке качества произведенной реконструкции применительно к деревьям процессов.

Модель динамики деревьев процессов

Для оценки качества реконструкции моделей процессов были использованы метрики соответствия [12, 13] и точности [14].

Высокий уровень соответствие (fitness) обеспечивает возможность воспроизведения реконструированной моделью поведения в журнале событий.

Точность характеризует отсутствие избыточности реконструированной модели по отношению к журналу.

Для оценки соответствия был использован подход [12], модифицированный для деревьев процессов. Алгоритм базируется на вычислении оптимального выравнивания трасс журнала L и последовательности срабатываний листовых узлов модели процесса PT . Метрика соответствия определяется как:

$$fitness(L, PT) = 1 - \frac{fcost(L, PT)}{move(L) + |L|move(PT)} \quad (1)$$

где $fcost(L, PT)$ – минимальное суммарное расстояние Левенштейна между выравненной трассой журнала и последовательностью срабатываний модели PT ;

$move(L)$ – суммарная длина трасс журнала событий

$move(PT)$ – длина наиболее короткой трассы модели процесса PT .

Наиболее сложным в приведенном алгоритме является вычисление оптимального выравнивания трассы журнала и последовательности срабатываний модели. Алгоритм базируется на идее совместного исполнения трассы l и дерева PT .

Состояние совместного выполнения процесса и трассы описывается кортежем $(M_i(PT), M_j(l))$, где $M_i(PT)$ – текущая маркировка дерева процессов PT , $M_j(l)$ – текущее выполненное действие трассы l .

Каждое совместное состояние имеет историю выполнения, которая представляет собой выравнивание процесса и трассы вплоть до текущей маркировки процесса и трассы. Например:

$$PT: \{a b c d e \wedge\}$$

$$l: \{\wedge b \wedge d e f\},$$

где \wedge – пропуск символа в модели PT или в трассе l .

Будем обозначать выравнивания как A_i . Каждое совместное состояние будем характеризовать выравниванием $A_i = \text{alignment}(M_i(PT), M_j(l))$.

На множестве выравниваний $\{A_i\}$ вводится функция стоимости $Price(A_i)$, равная числу столбцов в выравнивании содержащих различные символы. Для пустого множества действий $Price(\emptyset) = \infty$.

На указанной совместной маркировке могут быть заданы модифицированная функция $\text{enabled}(M_i(PT), M_j(l))$, возвращающая множество пар действий (a_{PT}, a_l) , которые могут сработать в совместном состоянии $(M_i(PT), M_j(l))$ и функция $\text{fire}(M_i(PT), M_j(l), a_{PT}, a_l)$, возвращающая новое совместное состояние при выполнении действий a_{PT}, a_l на модели процесса PT и трассе l . Допустимы следующие пары действий:

(a, a) – совместное выполнение действия a на модели и трассе;

(a, \perp) – выполнение действия a на модели и пропуск хода на трассе;

(\perp, b) – пропуск действия на модели и выполнение b на трассе.

Алгоритм вычисления оптимального выравнивания использует принцип динамического программирования. Основной структурой выступает приоритетная очередь маркировок MQ , в которую производится добавление сгенерированных совместных маркировок $(M_i(PT), M_j(l))$ и соответствующего совместному состоянию выравнивания $A_i = \text{alignment}(M_i(PT), M_j(l))$. В очереди добавленные совместные маркировки упорядочены по величине $Price(A_i)$.

Также используется вторая очередь – результатов MR , в которую помещаются финальные совместные маркировки. При запуске очередь MQ инициализируется начальными маркировками $\{(M_0, _)\}$. LL – список проанализированных маркировок. Из очереди MQ извлекается самая «хорошая» совместная маркировка (строка 4), стоимость которой меньше, чем лучшей маркировки из очереди результатов MR (условие выхода из цикла). Если извлеченная совместная маркировка – конечная, то она добавляется в очередь результатов MR (строки 6, 7). В противном случае сгенерированные и еще не проанализированные совместные маркировки добавляются в очередь результатов MR .

PT – ALIGNMENT

1 $(V, E, \{v_0\}) := (\{(M_0, _)\}, \emptyset, \{(M_0, _)\})$;

2 $MQ := \{(M_0, _)\}, MR := \{\emptyset\}, LL := \{\emptyset\}$;

3 **while** $Price(\text{Best}(MQ)) < Price(\text{Best}(MR))$

4 **do** $(M(PT), M(l)) = \text{Best}(MQ)$;

5 $MQ := Work \setminus \{(M(PT), M(l))\}$;

6 **if** $\text{enabled}(M(PT), M(l)) = \emptyset$

7 **then** $MR := MR \cup (M(PT), M(l))$ **else**

8 **for** $(a, b) \in \text{enabled}(M(PT), M(l))$

9 **do** $\{(M'(PT), M'(l))\} := \text{fire}(M(PT), M(l), a, b)$;

10 **for** $(M'(PT), M'(l)) \in \{(M'(PT), M'(l))\}$

11 **do if** $M'(PT), M'(l) \notin LL$

14 **then** $LL := LL \cup (M'(PT), M'(l))$

14 $MQ := MQ \cup (M'(PT), M'(l))$

15 **return** $\text{Best}(MR)$

Приведенный алгоритм всегда останавливается по причине конечности графа маркировок дерева процессов, как следствие бездефектности на уровне синтаксиса. Оптимальность найденного выравнивания следует из принципа динамического программирования.

Метрика точности характеризует отсутствие избыточности модели процесса по отношению к журналу. Она может быть вычислена как [14,15]:

$$\text{precision}(L, PT) = \frac{\sum_{s \in Q} \omega(s) \cdot |e_x(s)|}{\sum_{s \in Q} \omega(s) \cdot |a_v(s)|} \quad (2)$$

где Q – множество префиксов трасс журнала;

$\omega(s)$ – частота (счетчик) префикса s в журнале

$e_x(s)$ – множество действий, следующих за префиксом s трасс журнала

$a_v(s)$ – множество действий, непосредственно выполнимых из маркировки, в которую можно перевести модель, выполнив последовательность s .

Из определения следует, что всякое поведение, наблюдаемое в журнале, всегда будет представлено в модели процесса. Множество префиксов Q строится по предварительно вычисленным выравниваниям.

Оценка и прогнозирование параметров производительности

Как было сказано, помимо логической корректности, описываемой понятием бездефектности, бизнес-процесс должен характеризоваться определенными параметрами производительности [2]. Их наиболее точную оценку дает имитационное моделирование [16], однако оно ресурсоемко как по времени, так и по вычислительным ресурсам. Однако такие параметры как среднее время выполнения процесса и средние суммарные затраты, могут быть вычислены аналитически [17–19].

Формально время выполнения CT бизнес-процесса может быть рекурсивно вычислено на основании времен исполнения поддеревьев T_i следующим образом:

- Последовательное исполнение:

$$CT = \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

- Параллельное исполнение:

$$CT = \text{Max}(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (4)$$

- Условный выбор между поддеревьями с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n :

$$CT = \sum_{i=1}^n p_i T_i \quad (5)$$

Рассмотрим блок циклического исполнения на рис.4, где T_0 – длительность выполнения тела цикла, p_0 – вероятность завершения цикла, p_1, \dots, p_n – вероятности исполнения вариантов доработки, T_1, \dots, T_n – время исполнения вариантов доработки, T_{n+1} – время исполнения завершающего блока цикла.

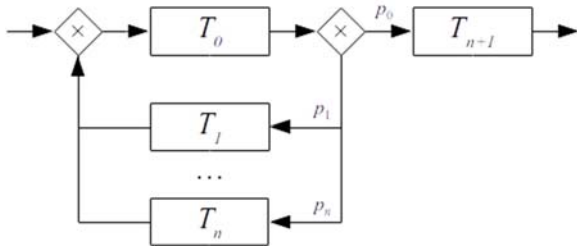


Рис. 4. Пример циклического процесса

Преобразуем схему, введя ещё один блок исключаящего исполнения и обозначив вероятности переходов (рис. 5). Указанные на рисунке вероятности вариантов доработки результата получены на основе теоремы Байеса исходя из вероятности доработки $1 - p_0$.

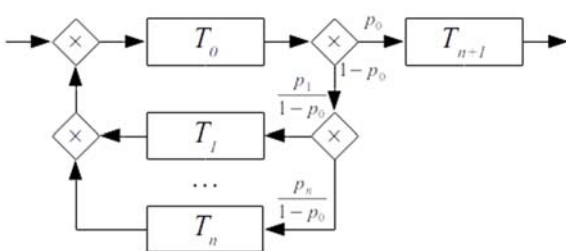


Рис. 5. Модифицированная схема циклического процесса

Полученный блок отображает случай, когда процессу требуется доработка. Заменим блок исключаящего исполнения элементарным блоком, считая вероятность перехода на данный блок: $p_r = 1 - p_0$, а время, по формуле (5):

$$T_r = \frac{1}{1-p_0} \sum_{i=1}^n T_i p_i.$$

Результат замены показан на рисунке 6.

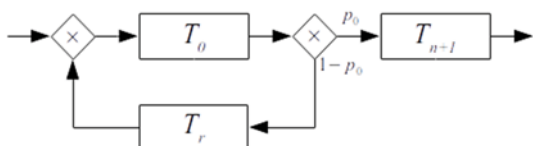


Рис. 6. Схема циклического процесса после замены

Узел окончания цикла и узел тела цикла выполняются в любом случае. Дополнительное время потребуется в случае доработок, т. е. получаем:

$$CT = T_0 + (T_r + T_0) \cdot (1 - p_0) + (T_r + T_0) \cdot (1 - p_0)^2 + \dots + T_{n+1} = (T_r + T_0) \cdot (1 + (1 - p_0) + (1 - p_0)^2 + \dots) - T_r + T_{n+1}$$

Применив формулу для суммы бесконечно убывающей геометрической прогрессии, получим итоговую оценку времени выполнения циклического процесса:

$$CT = \frac{T_r + T_0}{1 - (1 - p_0)} - T_r + T_{n+1} = \frac{T_0 + T_r(1 - p_0)}{p_0} + T_{n+1} = \frac{T_0 + \sum_{i=1}^n T_i p_i}{p_0} + T_{n+1} \quad (7)$$

Указанные соображения можно использовать для прогноза времени завершения с запущенным и частично исполненным процессом с текущим журналом выполнения L . Вычисление также производится рекурсивно от маркировки, соответствующей последней записи журнала. Для узлов последовательного, параллельного и исключаящего поведения методика схожа с формулами (3), (4), (5). При вычислении времени доработки для циклов рассматривается два случая: если маркер в момент вычисления находится в теле цикла (количество входов в тело больше количества выходов), и если маркер находится в блоке доработки (количество входов равно количеству выходов).

Пусть n – количество входов в тело цикла,

$CT_r = \frac{\sum_{i=1}^n T_i p_i}{1 - p_0}$ – среднее время доработки. Результирующая формула для первого случая:

$$CT = (CT_r + T_0) \left(1 + \frac{(1 - p_0)^n}{p_0}\right) \quad (8)$$

Для случая, когда на момент вычисления маркер находится в теле доработки:

$$CT = (CT_r + T_0) \left(1 + \frac{(1 - p_0)^{n+1}}{p_0}\right) \quad (9)$$

Экспериментальные исследования

Описанные алгоритмы были реализованы в разработанной системе электронного документооборота совместно с машиной исполнения бизнес-процессов Opengine [7]. Согласно принятой методологии [19-21] эксперимент производился на созданных журналах событий процесса, содержащего порядка 20 действий. В журналы вносились случайные пропуски действий (от 1 до 6). После чего производился расчет предложенными в работе алгоритмами и эталонной реализацией на инструментариим4ру [22,23]. В каждой из шести групп производилось от 20 (для 1 удаления) до 10000 (для 6 удалений) экспериментов. Результаты представлены на на рисунке 7.

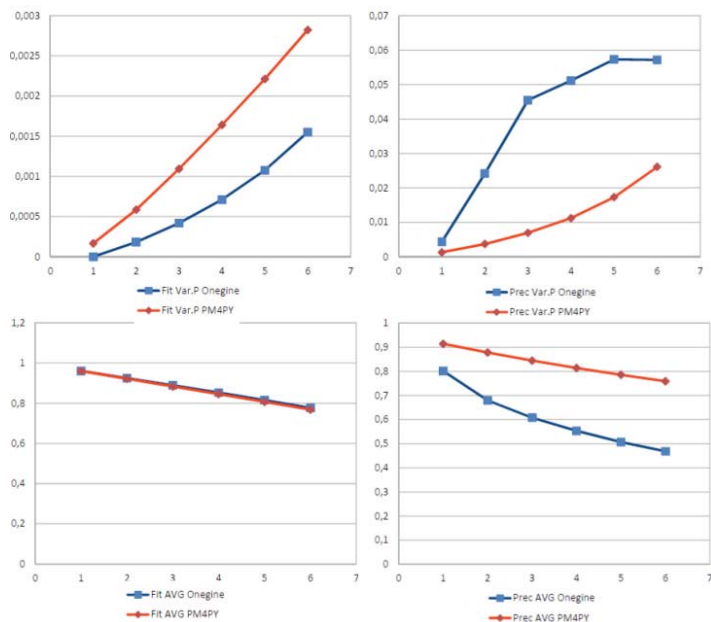


Рис. 7. Результаты экспериментального сравнения с pm4ru

По метрике точности наблюдалось полное совпадение результатов (график 3) по математическому ожиданию значения для всех 6 типов экспериментов при несколько меньшей дисперсии с сохранением формы закономерности (график 1). Для метрики точности наблюдалось сохранение формы закономерности математического ожидания (график 4) при меньших значениях и иная форма дисперсии (график 2). Полученное противоречие может быть объяснено отсутствием, в отличие от метрики соответствия единого способа вычисления [24], что было подтверждено сравнительным изучением исходного кода pm4ru и соответствующих плагинов ProM.

Заключение

В представленном прикладном исследовании были получены следующие выводы и результаты:

Реализованная схема и предложенные алгоритмы позволяют интегрировать средства описания, анализа и исполнения бизнес-процессов. Рассмотренные алгоритмы вычисления базовых метрик точности и соответствия показывают соизмеримые с известными инструментами результаты.

Использование платформы позволяет минимизировать использование сложных средств проверки корректности описания и повысить (до 2-3 раз) скорость внесения изменений в действующие бизнес-процессы.

Литература

1. W.M.P. van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 352 p.
2. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в анализ процессов. Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2020. 96 с.
3. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в структурный синтез процессов автоматизации управления (Process Mining). Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2021. 88 с.

4. Васильев Н.В., Забродин О.В., Куликов Д.В. Метод Process mining в системе защищенного электронного документооборота // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т.10. №6. С. 38-50.
5. M. McGregor. The death of process mining? [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining>, 2019.
6. W.M.P. van der Aalst. Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia (Blog Post Celonis). www.celonis.com, 2019.
7. Vasiliev N.V., Dorogov A.Y., Yashin A.I., Dovzhikov S.N. One-gine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes // 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819
8. Leemans S. J. J., Fahland D., W. M. P. van der Aalst. Discovering block-structured process models from incomplete event logs // Application and Theory of Petri Nets and Concurrency, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 91-110.
9. W.M.P. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen. A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14), vol. 11970 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 1-35. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
10. Kalenkova A.A., Burattin A., M. de Leoni, W.M.P. van der Aalst, and A. Sperduti. Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data // Business Process Management Journal, 25(5):995-1019, 2019.
11. W.M.P. van der Aalst. Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Röglinger, and J. Mendling, editors // International Conference on Business Process Management (BPM 2019), vol. 11675 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 3-9. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis. The Journal of Physical Chemistry. 2011, pp. 55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.
13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. Scalable process discovery and conformance checking. Software & Systems Modeling 17(2): 599-631, 2018.
14. D. Schuster, S.J. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst. Alignment Approximation for Process Trees // Computing Research Repository (CoRR) in arXiv, abs/2009.14094, 2020
15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa. Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2021. doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258.
16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano Garcia-Bañuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin. Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints // Data & Knowledge Engineering, Vol. 134, 2021, 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.
17. Dumas M., Rosa M.L., Mendling J., Reijers H.A. Fundamentals of Business Process Management (2-ed.). Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.
18. Schuh G., Gutzlaff A., Schmitz S., W.M.P. van der Aalst. Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing // CIRP Annals, 69(1):381-384, 2020.
19. C.Y. Li, S. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst. A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors



// Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019), BPM 2019 Workshop Proceedings, vol. 362 of Lecture Notes in Business Information Processing, pp. 199-211. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

20. Augusto A. *et al.* Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877

21. Vasiliev N. V., Yashin A. I., Dovzhikov S. N. Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach // 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283

22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan. Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science. 2019.

23. Berti A., S.J. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst. PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack // Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019, volume 2420 of CEUR Workshop Proceedings, pp. 174-183. CEUR-WS.org, 2019.

24. Augusto A. *et al.* Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877

INTEGRATION OF EXECUTION, PROCESS MINING AND PERFORMANCE ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES BASED ON A BLOCK APPROACH

NICKOLAY V. VASILIEV

Saint-Petersburg, Russia, gandvik1984@gmail.com

ALEXANDER I. YASHIN

Saint-Petersburg, Russia, a_yashin@inbox.ru

SERGEY N. DOVZHNIKOV

Saint-Petersburg, Russia, sergei.dovzhikov@gmail.com

KEYWORDS: *process trees, verification, business process execution machines, Petri nets, business process performance analysis.*

ABSTRACT

Introduction: the core of modern enterprise management information systems are machines for the execution of business processes. The vast majority of them use the BPMN2 description language (for example, JBPM, Activiti, Camunda). Despite the adoption of the standard, the editors' support for BPMN is platform-oriented and has limited capabilities for transferring descriptions. To create and maintain BPMN descriptions up to date, a business analyst, in addition to editors, uses a whole set of auxiliary tools, including verification tools (for example, WoPeD) and performance analysis (Bizagi, BIMP). The attraction for identifying and updating business processes of the methodology of in-depth analysis of processes (ProcessMining), which uses its own set of tools (Disco, ProM), in which BPMN support is limited. As a result, the integration of analysis tools and tools for the execution of business processes remains insufficient, which significantly slows down the implementation and updating of enterprise management systems. **Purpose of the study:** based on the general log processing methodology used by Process Mining, show that a block-structured approach based on process trees can be a universal formalism at all stages (reconstruction, quality analysis, analysis of time and cost parameters). **Methods:** theory of Petri nets, discrete mathematics, mathematical logic, theory of algorithms. Results: the scheme of integrated analysis of busi-

ness processes is described. A tree dynamics model is proposed and implemented, which is the basis for the implementation of a business process execution machine. On the basis of the dynamics model, an algorithm for constructing the reachability graph of process tree markings is proposed. Conformity and accuracy assessment algorithms have been modified for their application with process trees. Within the framework of the methodology for the analytical assessment of the performance parameters of block business processes, a formula for estimating the completion time of a cyclic block with several revision options is obtained. An experimental study of the effectiveness of the developed solution was carried out by means of full-scale modeling of the integrated analysis scheme and the proposed methods and its comparison with industrial instruments (pm4py) according to the criteria of accuracy and compliance of the reconstruction. The experimental results obtained make it possible to speak about characteristics comparable with the known instruments. This reduces the need for external tools, making changes faster. **Practical significance:** the ideas presented in the work were implemented in the Onegine virtual machine developed by the authors and tested in a number of experimental design works. The results described in the work can serve as a basis for creating more effective enterprise management systems.

REFERENCES

1. W.M.P. van der Aalst (2011). *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Berlin: Springer-Verlag. 352 p.
2. N.V. Vasiliev, A.I. Yashin (2020). *Introduction to process analysis. Tutorial (in Russian)*. SPb.: Publishing house SPbETU. 96 p.
3. N.V. Vasiliev, A.I. Yashin (2021) to the structural synthesis of control automation processes (Process Mining). *Tutorial (In Russian)*. SPb.: Publishing house SPbETU. 88 p.
4. N.V. Vasiliev, O.V. Zabrodin, D.V. Kulikov (2018). *Process mining method in a secure electronic document management system (in Russian)*. *Science-intensive technologies in space research of the Earth*. T.10. No. 6, pp. 38-50.
5. M. McGregor (2019). *death of process mining?* [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining>.
6. W.M.P. van der Aalst (2019). *Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia (Blog Post Celonis)*. www.celonis.com.
7. N.V. Vasiliev, A.Y. Dorogov, A.I. Yashin and S.N. Dovzhikov, (2020). *Onengine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes*. *2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, St. Petersburg, Russia, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819
8. S.J.J. Leemans, D. Fahland, and W.M.P. van der Aalst, (2014). *Discovering block-structured process models from incomplete event logs*. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, pp. 91-110.
9. W.M.P. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen (2019). *A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges*. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors, *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14)*, volume 11970 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 1-35. Springer-Verlag, Berlin.
10. A.A. Kalenkova, A. Burattin, M. de Leoni, W.M.P. van der Aalst, and A. Sperduti (2019). *Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data*. *Business Process Management Journal*, no.25(5), pp. 995-1019.
11. W.M.P. van der Aalst (2019). *Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask*. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Reglinger, and J. Mendling, editors, *International Conference on Business Process Management (BPM 2019)*, vol. 11675 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 3-9. Springer-Verlag, Berlin.
12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. (2011). *Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis*. *The Journal of Physical Chemistry*, pp. 55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.
13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. (2018). *Scalable process discovery and conformance checking*. *Software & Systems Modeling*, no. 17(2), pp. 599-631.
14. D. Schuster, S.J. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst (2020). *Alignment Approximation for Process Trees*. *Computing Research Repository (CoRR)* in arXiv, abs/2009.14094.
15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa (2021). *Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach*. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258
16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano Garcia-Baiuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin (2021). *Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints*. *Data & Knowledge Engineering*. Vol. 134. P. 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.
17. M. Dumas, M. L. Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers (2018). *Fundamentals of Business Process Management (2-ed.)*. Springer Publishing Company, Incorporated.
18. G. Schuh, A. Gutzlaff, S. Schmitz, and W.M.P. van der (2020). *Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing*. *CIRP Annals*, no. 69(1), pp. 381-384.
19. C.Y. Li, S. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst (2019). *A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching*. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors, *Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019), BPM 2019 Workshop Proceedings*, vol. 362 of *Lecture Notes in Business Information Processing*, pp. 199-211. Springer-Verlag, Berlin.
20. A. Augusto et al. (2019). *"Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark"*. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877
21. N. V. Vasiliev, A. I. Yashin and S. N. Dovzhikov (2021). *Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach*. *2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283
22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan (2019). *Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science*.
23. A. Berti, S.J. van Zelst, and W.M.P. van der Aalst (2019). *PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack*. *Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019*, vol. 2420 of *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 174-183. CEUR-WS.org.
24. A. Augusto et al. (2019). *Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark*. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Vasiliev N.V., PhD., Head division of department Joint-Stock Company "Inteltech"

Yashin A.I., DrSc., engineer, CEO's counselor Joint-Stock Company "Inteltech"

Dovzhikov S.N., engineer, Joint-Stock Company "Inteltech"

For citation: Vasiliev N.V., Yashin A.I., Dovzhikov S.N. Integration of execution, process mining and performance analysis of business processes based on a block approach // H&ES Reserch. 2021. Vol. 13. No. No 6. P. 60-68. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-6-60-68 (In Rus)