

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ,
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC
UNIVERSITY BULLETIN
**ELECTROTECHNICS,
INFORMATION
TECHNOLOGIES,
CONTROL SYSTEMS**

№ 29

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2019

Отражены результаты теоретических и прикладных разработок в области электротехники, системных исследований и моделирования в науке, технике и образовании, электромеханических систем управления, промышленных АСУ, АСУТП, АСНИ, САИ, аппаратурного и программного обеспечения информационно-управляющих систем, SCADA-систем, систем телекоммуникации и связи. Представленные материалы информируют о новейших программных и аппаратных средствах, опыте работы ученых электротехнического факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета, системной интеграции кафедр и промышленных предприятий региона. Приведены обзоры информационно-управляющих систем и комплексов, даны рекомендации по применению методического, аппаратного и программного обеспечения.

Предназначено для широкого круга специалистов в области электротехники, современных систем автоматизации и управления, а также для студентов старших курсов и аспирантов, у которых результаты исследований данных вопросов могут вызвать интерес.

Журнал включен в перечень ВАК от 29.05.2017 г.

Редакционная коллегия:

- Главный редактор** *А.М. Костыгов* – профессор, канд. техн. наук (Пермь, Россия)
Заместители
главного редактора *Н.М. Труфанова* – профессор, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
А.Г. Щербинин – доцент, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
А.А. Южаков – профессор, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
- Члены редколлегии** *В.Я. Беспалов* – профессор, д-р техн. наук (Москва, Россия)
С.В. Бочкарев – доцент, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
А.В. Дрозд – профессор, д-р техн. наук (Одесса, Украина)
Б.В. Кавалеров – доцент, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
В.П. Казанцев – доцент, д-р техн. наук (Пермь, Россия)
А.Л. Карякин – ст. науч. сотр., д-р техн. наук (Екатеринбург, Россия)
О.В. Крюков – доцент, д-р техн. наук (Н. Новгород, Россия)
Г.Г. Куликов – профессор, д-р техн. наук (Уфа, Россия)
В.А. Куликов – профессор, д-р техн. наук (Ижевск, Россия)
А.В. Кычкин – доцент, канд. техн. наук (Пермь, Россия)
В.И. Мещеряков – профессор, д-р техн. наук (Одесса, Украина)
В.А. Прохоров – канд. физ.-мат. наук, академик Академии связи Украины (Одесса, Украина)
В.В. Путов – профессор, д-р техн. наук (Санкт-Петербург, Россия)
Ф.Н. Саранулов – профессор, д-р техн. наук (Екатеринбург, Россия)
С.М. Слободян – профессор, д-р техн. наук (Омск, Россия)
В.Ф. Самосейко – профессор, д-р техн. наук (Санкт-Петербург, Россия)
С.А. Субботин – профессор, д-р техн. наук (Запорожье, Украина)
К.Г. Тергемес – доцент, канд. техн. наук (Алматы, Казахстан)
М.Л. Шит – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. (Кишинев, Республика Молдова)
Р.А. Файзрахманов – профессор, д-р экон. наук (Пермь, Россия)

Ответственный за выпуск *Д.К. Елтышев* – канд. техн. наук, доцент

Ответственный секретарь *А.В. Харив*

Журнал «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-56518 от 26 декабря 2013 года.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 40538.

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., 29.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Неганова Э.А., Марквирер В.Д., Плаксин М.А., Дерябин А.И.</i> Функционально-стоимостный анализ программного обеспечения киберфизической системы офисного здания	7
<i>Седых И.А., Сметанникова А.М.</i> Построение и исследование дискретных динамических окрестностных моделей в Mathcad.....	32
<i>Тур А.И., Кокоулин А.Н., Дзыгарь А.В.</i> Иерархическая система поиска и распознавания штрихкода на повреждённой таре в автомате раздельного сбора отходов	44
<i>Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р.</i> Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов	58
<i>Шапошников В.В., Токарев Р.О., Коротяев А.Д., Чабанов Е.А.</i> Расчет тягового усилия цилиндрического линейного асинхронного двигателя для привода плунжерного насоса	75
<i>Зиануров А.Ш., Вялых И.А.</i> Автоматизация градирни установки блока обратного водоснабжения БОВ-6 ООО "ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез"	92
<i>Шабуров А.С., Никитин А.С.</i> Модель обнаружения компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры	104
<i>Кирич Ю.П., Тихонов В.А.</i> Робастное управление процессом восстановления тетрахлорида титана магнием	118
<i>Тюрин С.Ф., Чудинов М.А.</i> FPGA LUT с двумя выходами декомпозиции по Шеннону	136

<i>Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф.</i>	
Результаты экспериментальных исследований опытного образца реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора	148
<i>Абдулов Р.Н., Асадов Х.Г.</i>	
Новый метод повышения помехоустойчивости GPS навигационных систем.....	174
<i>Большанин Г.А.</i>	
Связь коэффициентов восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.....	191
<i>Бурлаков М.Е., Ивкин А.Н.</i>	
Система обнаружения вторжения на основе искусственной иммунной системы	209

CONTENTS

<i>Neganova E.A., Markvirer V.D., Plaksin M.A., Deryabin A.I.</i> Value engineering analysis implemented to the cyber-physical system software of an office building	7
<i>Sedykh I.A., Smetannikova A.M.</i> Construction and investigation of discrete dynamic neighborhood models in Mathcad	32
<i>Tur A.I., Kokoulin A.N., Dzygar A.V.</i> Hierarchical barcode detection and recognition system for damaged containers in reverse vending machines	44
<i>Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R.</i> Development of engineering methods of calculation magnetic systems with permanent magnets on the basis of the finite element method	58
<i>Shaposhnikov V.V., Tokarev R.O., Korotaev A.D., Chabanov E.A.</i> Calculation of traction force of a cylindrical linear asynchronous engine for driving a plunger pump	75
<i>Zianurov A.Sh., Vyalykh I.A.</i> Automation of the cooling towers installation of water recycling BOV-6 LLC "LUKOIL-PERMNEFTEORGSINTEZ"	92
<i>Shaburov A.S., Nikitin A.S.</i> The model for detecting computer attacks on objects of critical information infrastructure	104
<i>Kirin Yu.P., Tikhonov V.A.</i> Robust control of the recovery process of tetrachloride titanium magnesium	118
<i>Tyurin S.F., Chudinov M.A.</i> FPGA LUT with two Shannon decomposition outputs	136

Gelver F.A., Belousov I.V., Samoseiko V.F.

Results of experimental research of an experimental sample
of reactive electrical machine with anisotropic magnetic
conductivity of the rotor148

Abdulov R.N., Asadov H.H.

New method for increase of anti-jamming stability of GPS
navigation systems174

Bolshanin G.A.

Connection of the occupational coefficients with two inputs
and six outputs191

Burlakov M.E., Ivkin A.N.

Intrusion detection system based on the artificial immune system.....209

УДК 004.2; 681.326; 519.713

Э.А. Неганова¹, В.Д. Марквирер¹,**М.А. Плаксин^{1,2}, А.И. Дерябин¹**

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Пермь, Россия

² Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, Россия

ФУНКЦИОНАЛЬНО-СТОИМОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОФИСНОГО ЗДАНИЯ

Широкое распространение киберфизических систем (cyber-physical system, CPS) связано с развитием концепции «Индустрия 4.0», в рамках которой первостепенное значение приобретают цифровая трансформация предприятий, использование новых методов управления на основе технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) и анализа больших данных (Big Data). В общем случае CPS – класс информационных систем, вычислительные элементы которых интегрированы в физические процессы и объекты, такие системы могут взаимодействовать между собой с использованием протоколов Интернета. Рост числа применений CPS обуславливает необходимость их проектирования с учётом специфических факторов предметной области. В состав киберфизических систем входит аппаратное и программное обеспечение, которое во многом оказывает влияние на безопасность и стоимость технического решения, удобство взаимодействия пользователей с системой. Важными особенностями программ CPS являются обеспечение долговременной работоспособности и высокая устойчивость, что во многом усложняется отсутствием единых унифицированных решений (шаблонов) для построения ПО CPS. Отсутствие шаблонов также влияет и на другие требования к ПО. Целью исследования является выявление способов оптимизации соотношения затрат (как материальных, так и нематериальных) и качества проектируемого программного обеспечения CPS, использующего технологии Интернета вещей, а также выражение их в виде рекомендаций, пригодных для дальнейшего использования. Одним из подходов, позволяющих оценивать сложные организационно-технические решения, является функционально-стоимостный анализ (ФСА). В работе выявлены функции проектируемого ПО CPS офисного здания, определена его структура, отражены результаты применения метода ФСА и сделаны выводы о практической значимости проведенного исследования. Работа выполнена в рамках приоритетного направления развития науки Пермского филиала НИУ ВШЭ «Исследование методов управления в киберфизических системах».

Ключевые слова: киберфизическая система, функционально-стоимостной анализ, Интернет вещей, программное обеспечение.

E.A. Neganova¹, V.D. Markvirer¹, M.A. Plaksin^{1,2}, A.I. Deryabin¹

¹National Research University «Higher School of Economics»,
Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

VALUE ENGINEERING ANALYSIS IMPLEMENTED TO THE CYBER-PHYSICAL SYSTEM SOFTWARE OF AN OFFICE BUILDING

Cyber-physical systems (CPS) are widely used due to the “Industry 4.0” concept development within which digital enterprise transformation and the use of new management techniques based on the Internet of Things (IoT) and Big Data analytics assume primary importance. In general, CPS is a class of information systems whose computational elements are integrated into physical processes and objects; such systems can interact with each other using Internet protocols. The growing number of situations requiring CPS implementation determines the necessity of CPS design that takes into account the specific factors of a subject area. The CPS structure includes hardware and software which in many ways affect the security and cost of a technical solution, the convenience of user interaction with the system. A significant CPS programs feature is ensuring long-term performance and high sustainability which is largely complicated by the lack of unified solutions (templates) for CPS software design. This obstacle affects the realization of other software requirements as well. The purpose of the study is to identify ways to optimize the cost/quality ratio of the CPS software being designed that uses the technologies of the Internet of Things and present findings in the form of recommendations suitable for further use. One of the methods that realize complex organizational and technical solutions evaluation is Value Engineering (VE). CPS software functions have been identified and the anticipated system software structure has been determined. The results of applying the VE method to CPS software have been reflected and the conclusions considering the practical significance of the study have been drawn. The analysis has been carried out within the priority area of scientific development established in the National research university Higher school of economics (Perm) – “Research on control methods in cyber-physical systems”.

Keywords: cyber-physical system, value engineering, Internet of Things, software.

Введение. Широкое распространение киберфизических систем (cyber-physical system, CPS) обусловлено развитием концепции «Индустрия 4.0» [1], в рамках которой первостепенное значение приобретают цифровая трансформация предприятий, использование новых методов управления на основе технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT) [2, 3] и анализа больших данных (Big Data) [4]. В общем случае CPS – это класс информационных систем, вычислительные элементы которых интегрированы в физические процессы и объекты. Такие системы могут взаимодействовать между собой с использованием протоколов Интернета. CPS построены с использованием современных сенсорных, вычислительных и сетевых технологий [1, 5, 6], их применение способствует повышению безопасности и надежности, сокращению энергозатрат [7, 8]. Рост числа применений CPS обуславливает необхо-

димось их проектирования с учётом специфических факторов предметной области. В состав киберфизических систем входит аппаратное и программное обеспечение, которое во многом оказывает влияние на безопасность и стоимость технического решения, удобство взаимодействия пользователей с системой. Обеспечение долговременной работоспособности и высокая устойчивость являются важными особенностями программ CPS. Разработка ПО CPS во многом усложняется отсутствием единых унифицированных решений (шаблонов) для построения ПО CPS. Большинство доступных на рынке решений имеют закрытую архитектуру, их аналитические компоненты невозможно применить к конкретным зданиям и условиям эксплуатации [2]. Эта ситуация обуславливает перспективность реализации открытых платформ такого рода. Например, такие работы ведутся в пермском филиале Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Проектирование ПО CPS сопровождается большими затратами. В материальном производстве существует метод оценки объекта с целью выявления и уменьшения затрат (стоимости реализации) при одновременном сохранении или повышении качества исследуемого объекта – функционально-стоимостной анализ (ФСА). В классическом понимании основным объектом ФСА являются технические системы [9]. Согласно современному представлению объектом ФСА могут выступать изделие, технологический процесс, организационная структура [10]. Вызывает интерес возможность применения данного метода к информационным системам, в частности программным продуктам. Поэтому было решено выявить степень пригодности данного метода к оценке ПО, применив ФСА при разработке не аппаратной, а программной части CPS, в частности ПО CPS офисного здания. Целью исследования является выявление способов оптимизации соотношения затрат (как материальных, так и нематериальных) и качества проектируемого программного обеспечения CPS, использующего технологии Интернета вещей, а также выражение их в виде рекомендаций, пригодных для дальнейшего использования.

1. Оценка возможности применения ФСА к программному обеспечению информационных систем. В работе [11] приводится следующая классификация методов оценки информационных систем (ИС): методы финансового анализа, методы качественного анализа (эвристическая оценка), методы инвестиционного анализа, методы вероятностного анализа. Также известен стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015,

согласно которому функциональная пригодность ПО является неотъемлемой характеристикой модели качества системы и определяется как величина, показывающая соответствие выполнения продуктом или системой функций заявленным потребностям использования в определённых условиях.

Одним из подходов, позволяющих оценивать сложные организационно-технические решения, является функционально-стоимостный анализ (ФСА), разработанный в конце 40-х гг. XX в. одновременно и независимо советским и американским инженерами Ю.М. Соболевым (Пермский телефонный завод) и Л.Д. Майлсом (General Electric).

Прежде всего необходимо уточнить терминологию. Ю.М. Соболев свой метод именовал «поэлементным анализом», а Л.Д. Майлс использовал названия Value Analysis или Value Engineering (VA/VE). В современной русскоязычной литературе закрепился термин «функционально-стоимостной анализ» (ФСА).

Однако этим же названием – ФСА – в русскоязычной литературе иногда обозначают метод расчета себестоимости продукции, который по-английски именуется Activity Based Costing (ABC-метод). Метод служит для определения себестоимости продукции с учетом затрат, возникающих при выполнении конкретных операций (видов деятельности). В контексте оценки эффективности ИТ-проектов ABC-метод относится к методам контроля затрат [12, 13].

Аббревиатура «ABC», в свою очередь, используется еще в одном названии: «ABC-анализ». ABC-анализ – это метод ранжирования ресурсов предприятия, в зависимости от их вклада в прибыль или продажи. При этом ресурсы распределяются по трем категориям: наиболее ценные, промежуточные, наименее ценные. Метод может применяться, например, с целью выявления нерентабельных или низкорентабельных групп товаров и своевременного изменения ассортиментного ряда [14].

В рамках данной работы под функционально-стоимостным анализом понимается «поэлементный анализ» Ю.М. Соболева и Value Analysis/Value Engineering Л.Д. Майлса. ФСА – это метод совершенствования объекта (технической системы), достигаемого за счет систематического исследования структуры и функций объекта, а также поиска способа оптимизации соотношения качества системы и затрат на ее реализацию [15]. ФСА исходит из того, что потребителю нужна не система, а результат ее деятельности, ее функция. Потребитель вынужден приобретать систему,

потому что без нее он не получит функцию. Система – это инструмент получения функции. Каждая система обладает целым спектром функций, которые отличаются «степенью значимости» для потребителя. Для выполнения каждой из этих функций задействованы какие-то части (компоненты) системы. Процессы изготовления и эксплуатации каждой из этих частей имеют свою стоимость. Стоимость компонентов определяет стоимость реализуемых ими функций. ФСА позволяет установить соотношение между значимостью функции и стоимостью ее реализации. Он постулирует необходимость соответствия этих двух параметров. Стоить «дорого» имеют право только те функции, которые имеют высокую значимость для потребителя. Функция малозначащая должна стоить «дешево» [16–18].

ФСА состоит из следующих этапов:

1. Подготовительный этап – выбор объекта анализа, определение его перспективности для исследования, наличия узких мест объекта и стоимости его реализации.

2. Информационный этап – сбор и систематизация информации об исследуемом объекте.

3. Аналитический этап, в который входят классификация функций системы и экспертная оценка их значимости, определение компонентов системы, реализующих её функции, экспертная оценка стоимости компонентов системы, перенос стоимости компонентов на реализуемые ими функции. На этом же этапе выполняется сопоставление значимости и стоимости функций.

4. Творческий этап – разработка предложений по совершенствованию исследуемой системы.

5. Исследовательский этап – экспериментальная проверка предложенных решений.

6. Рекомендательный этап – принятие окончательного решения о внедрении идей, разработанных на творческом этапе.

7. Внедренческий этап – внедрение принятых решений и контроль реализации намеченного плана работ.

Рассмотрим некоторые примеры применения метода ФСА. Так, в работе [10] метод ФСА используется для оценки инновационного проекта, авторами приводится описание этапов применения метода.

В работе [19] метод ФСА применяется в рамках концепции бережливого производства, предполагающего исключение затрат, не увеличивающих ценность продукции. В работе метод применяется для материального продукта, а не для программного обеспечения.

В [9] отмечается, что попытки применить метод ФСА к нематериальным объектам (**работам, услугам, нематериальным активам**) сопровождались невозможностью реализации всего комплекса работ ФСА, пригодных для анализа материальных объектов. В отношении нематериальных объектов удавалось применить лишь отдельные элементы или приемы ФСА, но не весь метод в целом. В работе приводится вывод о том, что основными объектами, для которых может быть применен метод ФСА, остаются материальные объекты.

Работа [20], напротив, направлена на оценку целесообразности применения метода ФСА к нематериальным продуктам: автоматизированным ИС. Автором определяется цель применения метода ФСА: усилить полезность функций объекта автоматизации при оптимальном соотношении их значимости для целей управления и затрат на их обслуживание (внедрение, обновление, поддержку). В работе отмечается, что функциональная структура предприятия определяет используемые прикладные программные продукты, подтверждается мысль о том, что метод ФСА может быть применен для ПО. В статье показан процесс определения функций автоматизированной информационной системы (АИС) и их значимых коэффициентов, определения затрат на обеспечение, статьи расходов, из которых формируются инвестиции на АИС, отмечается, что источником данных может быть экспертная оценка. К сожалению, в статье не показано, что следует дальше делать со значимостью программных функций и их стоимостью. Отметим, что в [17] описывается применение функционально-стоимостного анализа на этапе внедрения АИС. Данная статья посвящена применению ФСА к программному обеспечению на этапе разработки.

Таким образом, анализ литературы позволил выявить основные преимущества применения метода ФСА, ключевые этапы этого метода и примеры его применения, подтвердить возможность адаптации метода к оценке нематериальных объектов. Следует отметить низкую степень проработанности данного вопроса в отношении оценки программных продуктов.

2. Использование ФСА при проектировании программного обеспечения CPS офисного здания

2.1. Характеристика объекта ФСА.

На первом этапе анализа был определен объект исследования – CPS офиса многоэтажного здания. По экспертным оценкам стоимость ПО для объекта задана из расчета 1 тыс. руб. за 1 м², что составляет для нескольких помещений

около 500 тыс. рублей. Эти затраты связаны с программированием оборудования, покупкой лицензионного ПО, оплатой труда интеграторов, а также других работ, которые зависят от размера помещения и особенностей инфраструктуры. Перспективность применения CPS в офисе заключается в совершенствовании условий рабочей среды для сотрудников, в переходе к новым технологиям управления энергоресурсами здания. Наличие узких мест объекта обуславливается применением технологий IoT управления, которые остаются малоизученными и сложными для понимания, трудностью в организации правильного взаимодействия физических объектов и вычислительных устройств, обеспечением безопасности данных, а также высокой стоимостью для конкретной области применения (цена системы зависит от масштаба предприятия/здания/помещения и необходимых характеристик).

Вопросы, связанные с проектированием ПО CPS, обсуждаются в работах [2, 4, 6]. Так, в работе [2] ПО CPS рассматривается как программная платформа управления интеллектуальными зданиями, основанная на технологии Интернета вещей (IoT). Отмечается, что такие системы входят в состав комплексных систем класса BEMS – Building Energy Management System и являются инструментами энергоресурсосберегающих мероприятий в зданиях.

В работе [6] поднимается вопрос о достаточности доступных на сегодняшний день вычислительных и сетевых технологий для реализации CPS, перечисляются требования к CPS. Так, отмечается, что CPS предназначены для работы в неконтролируемой среде и должны быть устойчивыми к неожиданным условиям и отказам подсистем.

В статье [1] авторами определяется принципиальное отличие CPS от существующих встроенных систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), заключающееся в способности CPS интегрировать кибернетический подход к управлению системой, аппаратные и программные технологии, исполнительные устройства, выполненные на новом технологическом уровне, встроенные в окружающую среду и способные воспринимать ее изменения, реагировать на них, обучаться и адаптироваться к изменениям. Авторами также описываются принцип работы CPS и семь уровней её архитектуры. Акцент делается на вопросы обеспечения информационной безопасности CPS, анализируются основные типы кибератак, предлагается дерево угроз информационной безопасности.

2.2. Оценка и сопоставление значимости и стоимости функций и компонентов системы. После определения объекта исследования была выполнена систематизация функций объекта. Функции делятся на главные и второстепенные, а второстепенные – на полезные, нейтральные и вредные. Были выявлены две главные функции – это обеспечение управления затратами на энергоресурсы и создание благоприятной среды для человека (контроль температуры, влажности и т.п.).

Для главных функций была построена иерархия высотой в три уровня. Каждая из главных функций была разделена на 5 вспомогательных функций, которые, в свою очередь, были разделены на более мелкие подфункции. Например, для реализации функции снижения затрат на эксплуатацию и прочих издержек необходимо реализовать функцию сбора информации с приборов учета [21], что, в свою очередь, обеспечивается за счёт реализации измерения параметров окружающей среды и преобразования полученных данных с датчиков в сигналы, пригодные для обработки и анализа вычислительными устройствами. Аналогично были выделены другие функции системы. В результате были сформированы три уровня функций [22], на первом уровне представлены 2 функции, на втором уровне – 10 функций, а на третьем уровне – 27 функций. Значимость функций для потребителя была оценена экспертным путем. В состав экспертной группы вошли специалисты в области бизнес-информатики, программной инженерии, киберфизических систем и Интернета вещей. Агрегация экспертных оценок проводилась методом голосования.

Методика, использованная для оценки значимости функций, заключается в следующем. Предполагается, что суммарная значимость полезных функций первого уровня равна 100 %. Эти 100 % были распределены между всеми функциями первого уровня. В данном случае их две – «Снижение затрат на эксплуатацию и прочих издержек» и «Создание благоприятной и комфортной среды для пользователей CPS офисного помещения». Их значимость составила соответственно 56 и 44 %. Эти величины были определены как «глобальная значимость» функций первого уровня.

В результате декомпозиции функций первого уровня под каждой из них расположена соответствующая группа функций второго уровня.

Суммарная «локальная значимость» группы функций второго уровня также была определена равной 100 %. Эти 100 % были поделены между всеми функциями группы. Для функции «Снижение затрат на эксплуатацию и прочих издержек» локальная значимость функций второго уровня была оценена так: «Получение информации из окружающего мира» – 19 %, «Хранение данных – 16 %, «Интеграция подсистем и обеспечение совместной работы оборудования, обмен данными» – 18 %, «Анализ данных» – 23 %, «Принятие решений по оптимизации энергозатрат» – 24 %. Для функции «Создание комфортной среды» локальная значимость функций второго уровня была определена как 21 % для «Интерфейс взаимодействия с CPS», 21 % для функции «Передача воздействий на объекты управления», 21 % для «Обработка ошибок», 20 % для «Обеспечение безопасности», 17 % для «Ускорение и повышение качества настройки оборудования».

После этого «локальная значимость» функций второго уровня была пересчитана в «глобальную значимость». Для этого «локальная значимость» функции умножалась на «глобальную значимость» вышестоящей функции предыдущего уровня. Например, расчет «глобальной значимости» для функции второго уровня «Получение информации из окружающего мира»: $19 \cdot 56 = 11$ % (после арифметического округления). Аналогично значение «глобальной значимости» было получено для всех функций второго уровня. Далее эти же действия – оценка «локальной значимости» и вычисление «глобальной значимости» – были проведены для функций третьего уровня.

Результаты расчетов «глобальных значимостей» функций системы показаны в табл. 1 (с учетом арифметического округления до единиц). Значимость функции обозначена I_f .

Следующий этап анализа согласно методу ФСА заключается в определении структуры объекта анализа и стоимости составляющих его компонентов. За основу определения системной архитектуры ПО CPS было взято типовое архитектурное решение для системы управления энергоресурсами здания на основе технологий Интернета вещей, разработанное в рамках приоритетного направления развития науки пермского филиала НИУ ВШЭ «Исследование методов управления в киберфизических системах» [2].

Таблица 1

Список функций ПО CPS офисного здания

Функции		Значи- чи- мость, I_f , %
Главные		100
1	Снижение затрат на эксплуатацию и прочих издержек	56
1.1	Получение информации из окружающего мира	11
	1.1.1 Измерение контролируемых параметров (температура, качество воздуха, влажность и т.д.)	5,5
	1.1.2 Преобразование контролируемых параметров в цифровую форму	5,5
1.2	Хранение данных	9
	1.2.1 Сбор данные из разных источников	1,3
	1.2.2 Подключение внешних систем к CPS	1,3
	1.2.3 Агрегация данных	1,2
	1.2.4 Хранение атрибутов и характеристик объектов здания	1,2
	1.2.5 Хранение метрик (температура, давление, влажность и т.д.), распределенных по времени	1,5
	1.2.6 Актуализация БД	1,3
	1.2.7 Хранение многомерных данных	1,2
1.3	Интеграция подсистем и обеспечение совместной работы оборудования, обмен данными	10
	1.3.1 Связь физических устройств между собой	2
	1.3.2 Обеспечение безопасности каналов связи	2
	1.3.3 Обеспечение доступа к сторонним приложениям, серверам и т.д.	2
	1.3.4 Получение от клиентской части запросов на ресурсы, предоставление доступа к необходимым данным	2
	1.3.5 Управление подсистемами	2
1.4	Анализ данных	13
	1.4.1 Поиск закономерностей в больших массивах данных	3,3
	1.4.2 Прогноз поведения объекта с целью принятия оптимальных решений	3,2
	1.4.3 Поиск паттернов в исторических данных, идентификация рисков и возможностей по улучшению системы	3,3
	1.4.4 Планирование математических экспериментов	3,2
1.5	Принятие решений по оптимизации энергозатрат	13
2	Создание благоприятной и комфортной среды для пользователей CPS офисного помещения	44
2.1	Интерфейс взаимодействия с CPS	9
	2.1.1 Работа через мобильные устройства	1
	2.1.2 Отображение веб-ресурсов, вывод на экран результатов запросов	2
	2.1.3 Передача информации между пользователем и программно-аппаратными компонентами CPS	2
	2.1.4 Визуализация метрик в виде графиков	2
	2.1.5 Формирование отчетов	2
2.2	Передача воздействий на объекты управления	9
2.3	Обработка ошибок	9
2.4	Обеспечение безопасности	9
	2.4.1 Безопасное взаимодействие CPS с пользователем	2,3
	2.4.2 Кибербезопасность	2,2
	2.4.3 Учет аварий; фиксация инцидентов и неисправностей в системе, анализ инцидентов с целью планирования превентивных мер защиты и улучшения системы	2,3
	2.4.4 Управление учётными записями и контроля доступа	2,2
2.5	Ускорение и повышение качества настройки оборудования	8

Стоимость компонентов была оценена экспертным путем. Экспертная группа была представлена теми же специалистами, что и при оценке значимости функций ПО CPS. Агрегация экспертных оценок также проводилась методом голосования. Стоимость компонентов определялась с учетом доступных информационных источников компаний производителей систем управления зданиями, систем «Умный дом», систем автоматизации, энергоучетных систем, а также с учетом среднерыночных зарплат разработчиков ПО в Пермском крае.

В табл. 2 представлены структура ПО CPS офисного здания [23–27] и оценка стоимости каждого компонента системы. Стоимость в рублях каждого компонента была пересчитана в его «процентную стоимость» (долю затрат на данный компонент от общей стоимости системы). «Процентная стоимость» компонентов обозначена V_e .

Таблица 2

Структура ПО CPS офисного здания

Компонент		Стоимость, руб	Стоимость, V_e , %	
1.	Клиентская часть	583500	19,14	
	1.1.	ПО датчиков	6500	0,21
	1.2.	ПО исполнительных устройств	17000	0,56
	1.3.	Мобильное приложение	500000	16,40
	1.4.	Браузер	0	0
	1.5.	Интерфейс программ моделирования	60000	1,97
2.	Локальная вычислительная сеть	60000	1,97	
3.	Сервер	126000	4,13	
	3.1.	ПО Web-сервера	66000	2,16
	3.2.	ПО Сервера визуализации	60000	1,97
4.	Набор сервисных приложений	1300000	42,65	
	4.1.	ПО блока управления	125000	4,10
	4.2.	ПО блока сбора данных	125000	4,10
	4.3.	ПО блока анализа аварийных ситуаций	125000	4,10
	4.4.	ПО блока отчетов	110000	3,61
	4.5.	ПО блока защиты данных	110000	3,61
	4.6.	ПО блока внешних подключений	110000	3,61
	4.7.	ПО блока интеграции с внешними БД	125000	4,10
	4.8.	ПО блока планирования расчетов	125000	4,10
	4.9.	ПО блока предиктивных моделей	125000	4,10
	4.10.	ПО блока самодиагностики	110000	3,61
	4.11.	ПО блока энергетической оптимизации	110000	3,61
5.	Сервер баз данных	980000	32,14	
	5.1.	ПО для работы с реляционной базой данных	100000	3,28
	5.2.	ПО для работы с базой данных временных рядов	360000	11,81
	5.3.	ПО для работы с внешними базами данных	200000	6,56
	5.4.	ПО для работы с OLAP кубами	320000	10,49

Далее необходимо было определить, какие элементы системы реализуют перечисленные функции. Для этого были взяты две иерархии – иерархическая структура системы и иерархия ее функций – и соединены в единую структурно-функциональную схему. На структурно-функциональной схеме каждая функция соединена с теми компонентами, которые ее реализуют, а каждый компонент – с теми функциями, в реализации которых он принимает участие. Графически связь функций и компонентов ПО CPS представлена на рис. 1.

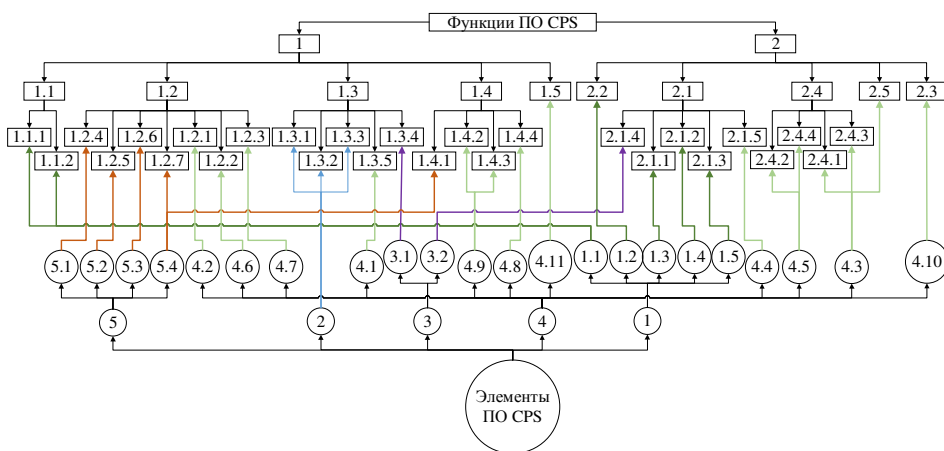


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ПО CPS офисного здания

Структурно-функциональная схема позволяет связать оценку значимости и оценку стоимости: перенести значимость функций на компоненты системы, а стоимость компонентов – на функции. Оценка значимости каждого компонента рассчитывается согласно значимости функций, реализуемых этим компонентом. Если функция реализуется несколькими компонентами, значимость каждой функции I_f разделяется равномерно между компонентами ПО CPS, участвующими в реализации этой функции. Если компонент реализует несколько функций, то он получает свою «долю значимости» от каждой из реализуемых функций, в совокупности составляющих значимость компонента ПО CPS. Этот параметр был обозначен как I_e . Аналогично, стоимость каждой функции определяется стоимостью компонентов, ее реализующих. Если компонент выполняет несколько функций, его стоимость V_e распределяется равномерно между функциями. Если функция реализуется несколькими компонентами, ее стоимость складывается из «долей стоимости», полученных от каждого компонента.

Решение равномерного распределения значимости функций между компонентами и стоимости компонентов между функциями было принято только из соображений простоты расчетов. Анализ может быть проведен также и с использованием более сложных правил переноса стоимости на функции и значимости на компоненты.

В целях сохранения объема статьи в разумных пределах таблицы со значениями стоимости функций и значимости компонентов опущены. На рис. 2 показаны результаты сопоставления значимости и стоимости компонентов ПО CPS офисного здания.

Стоит отметить, что отступление от классического ФСА делается намеренно. В классическом варианте применения метода анализируются значимость и стоимость функций. Если стоимость выше значимости функции, следует искать более дешевые пути реализации этой функции. В данном исследовании, наоборот, проводится сопоставление стоимости и значимости компонентов при фиксированных функциях. Это позволяет выявить, для каких компонентов запланированы не самые удачные способы реализации, и определить более экономичные способы при одинаковых выполняемых компонентами функций в условиях большой вариативности возможных решений. На диаграмме (рис. 2) стоимость компонента окрашена в чёрный цвет, а значимость – в серый.

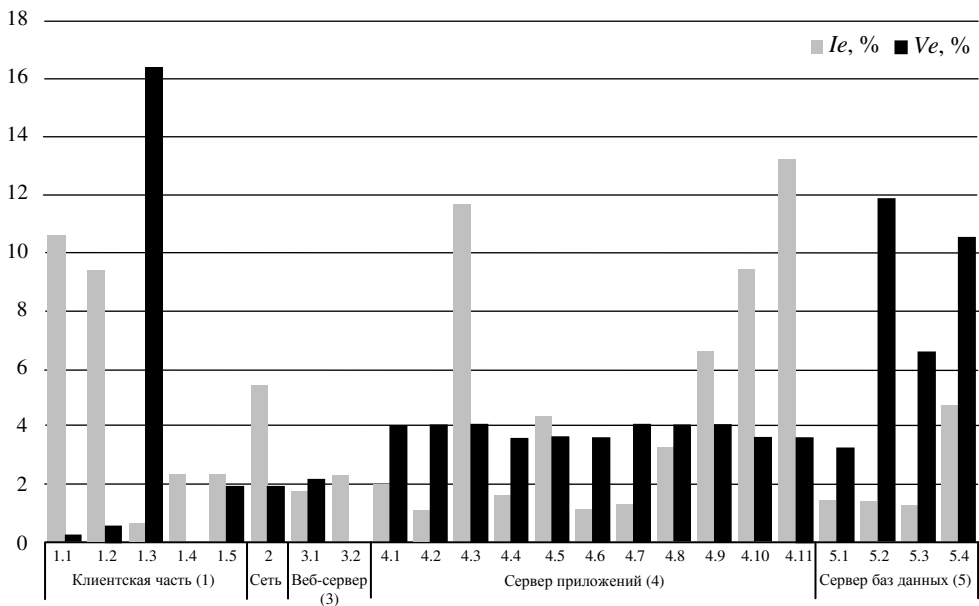


Рис. 2. Сопоставление значимости I_e и стоимости V_e компонентов ПО CPS офисного здания

Ситуация, когда для одного компонента оба столбца получаются одинаковой высоты, считается идеальной. На практике такое встречается редко. Так, в нашем случае четко выделяются компоненты с высокой значимостью и низкой стоимостью (1.1, 1.2, 4.3, 4.10, 4.11) и компоненты с высокой стоимостью и низкой значимостью (1.3, 5.2, 5.3, 5.4). По данным этой диаграммы были определены компоненты, для которых можно выявить рекомендации по понижению стоимости. Примеры решений показаны в табл. 4.

Стоимость компонентов ПО CPS – это стоимость реализации системы. С точки зрения жизненного цикла ИС – это однократные расходы, после которых следует распространение готового ПО. Внедрение и сопровождение системы – многократно повторяющийся процесс, количество повторов которого определяется количеством проданных лицензий. Следовательно, расходы, связанные с этими этапами жизненного цикла системы, должны учитываться иначе, чем расходы этапа реализации. Расходы на этапе внедрения возникают в процессе настройки ПО для определенных условий эксплуатации. Расходы на этапе сопровождения – это расходы доработки и изменения ПО, добавления функциональности, улучшения удобства использования ПО.

Таким образом, для каждой инсталляции разрабатываемого ПО CPS стоимость складывается из трех составляющих – стоимости разработки, внедрения и сопровождения, но последние две должны учитываться особым образом. Было введено понятие *сложности*, включающее в себя стоимость и кратность расходов каждого из трех этапов жизненного цикла ПО CPS.

Сложности реализации, внедрения и сопровождения, выраженные в процентах, были обозначены C_1 , C_2 и C_3 соответственно. В качестве значений сложности реализации C_1 был использован параметр V_e каждого компонента ПО CPS, значения при этом были округлены до целых. Для оценки сложности внедрения и сопровождения членами экспертной группы были использованы промежуточные значения C_2^* и C_3^* , показывающие количество «баллов сложности» из диапазона от 0 до 100, присужденных каждому компоненту (табл. 3). Баллы сложности C_2^* и C_3^* впоследствии были приведены к нормированным показателям C_2 и C_3 согласно формуле:

$$C_{ij} = \frac{C_{ij}^*}{\sum_{j=1}^N C_{ij}^*} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где i, j – число элементов ПО CPS, $i = 1..3, j = 1..N, N$.

Затем была рассчитана итоговая сложность C для каждого компонента по формуле:

$$C_j = \frac{\sum_{i=1}^3 C_{ij}}{\sum_{j=1}^N (\sum_{i=1}^3 C_{ij})} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

Результаты экспертной оценки можно увидеть в табл. 3.

Таблица 3

Определение сложности компонентов ПО CPS офисного здания

№		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2	3.1	3.2	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	4.10	4.11	5.1	5.2	5.3	5.4
Сложность реализации	C_1^*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C_1	0%	1%	16%	0%	2%	2%	2%	2%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	12%	7%	10%
Сложность внедрения	C_2^*	10	10	60	0	10	10	30	20	80	80	40	30	30	80	80	40	40	80	40	10	20	10	50
	C_2	1%	1%	7%	0%	1%	1%	3%	2%	9%	9%	5%	3%	3%	9%	9%	5%	5%	9%	5%	1%	2%	1%	6%
Сложность сопровождения	C_3^*	0	0	20	0	0	10	0	0	50	50	20	10	10	50	50	20	20	50	20	20	20	0	40
	C_3	0%	0%	4%	0%	0%	2%	0%	0%	11%	11%	4%	2%	2%	11%	11%	4%	4%	11%	4%	4%	4%	0%	9%
Итоговая сложность	C	0%	1%	9%	0%	1%	2%	2%	1%	8%	8%	4%	3%	3%	8%	8%	4%	4%	8%	4%	3%	6%	3%	8%

2.3. Ранжирование компонентов по сложности и значимости.

Выработка рекомендаций по усовершенствованию ПО. Далее было проведено сравнение значимости и сложности каждого компонента. Это можно было сделать с помощью столбчатой диаграммы, аналогично рис. 2, но более информативным инструментом в данном случае является отображение компонентов системы в координатной плоскости, вертикальная ось которой отображает сложность компонентов C , а горизонтальная – значимость I_e [28]. При этом некоторые значения были округлены, что позволило упростить построение графика без искажения его смысла. На рис. 3 точно отражено положение каждого элемента ПО CPS в координатной плоскости. Полученный график был разделен на четыре равных области: D , E , E^* , F .

Левая верхняя область (D) – это компоненты с высоким значением параметра «сложность», но характеризующиеся слабой значимостью для системы в целом.

Правая верхняя область (E) – это значимые компоненты для системы, но сложные в плане реализации, внедрения и сопровождения.

В этой области расположен один компонент – ПО блока самодиагностики. Действительно, этот блок важен для системы, поскольку он позволяет избежать сбоев в работе, при этом это технически сложный компонент, не имеющий доступных программных реализаций; его отладка и настройка на реальном объекте будут затруднительными.

Левая нижняя область (E^*) противоположна E , т.е. элементы, попадающие в эту область, достаточно просты и имеют относительно небольшую значимость для системы в целом.

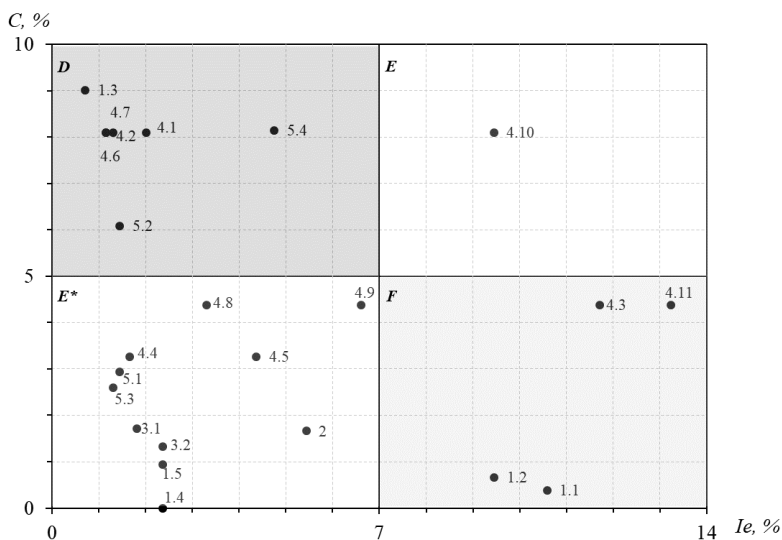


Рис. 3. Анализ сложности и значимости каждого компонента ПО CPS: C – сложность, I_e – значимость

Правая нижняя область (F) – наиболее значимые и наименее сложные компоненты, они характеризуются идеальным соотношением этих двух параметров. Желательно, чтобы все компоненты ПО CPS оказались в этой области. Для того чтобы достигнуть этого, необходимо выяснить, какими способами можно повысить значимость компонентов, оказавшихся в областях D и E^* , понизить сложность компонентов, попавших в области D и E .

Так, были сформулированы примеры рекомендаций по усовершенствованию отношения значимость/сложность разрабатываемых компонентов ПО CPS офисного здания (табл. 4), которыми могут воспользоваться руководители проектов, системные архитекторы, специалисты по разработке ПО.

Таблица 4

Пример оформления списка рекомендаций
к компонентам ПО CPS офисного здания

№ компонента ПО CPS	Рекомендация	Повышение, I	Снижение, C
1.3	Предоставить пользователю возможность управления объектами CPS здания в локальной сети посредством смартфона или планшета без подключения к Интернету	+	
	Создать веб-приложение и адаптировать его для работы на мобильных устройствах		+
3.1	Увеличить число возможных подключений клиентов к веб-серверу до 1 млн	+	
3.2	Ориентировать вывод информации в графическом виде	+	
4.1	Повысить число подключенных датчиков и исполнительных механизмов	+	
	Разделить функции управления между несколькими блоками. Обеспечить декомпозицию задачи управления и синхронизацию передачи команд		+
4.4	Вывести в отчеты прогнозы изменений характеристик системы и рекомендации по улучшению системы.	+	
4.6	Интегрировать в систему оборудование от различных производителей	+	
	Применить унифицированные интерфейсы компонент и открытые протоколы		+
4.7	Увеличить частоту обращения к внешним системам и БД	+	
	Применить существующие решения по интеграции системы с внешними БД		+
4.8	Увеличить количество экспериментов	+	
4.9	Реализовать прогноз изменений параметров	+	
5.1	Повысить количество атрибутов объектов	+	
5.2	Повысить частоту дискретизации измерений	+	
	Повысить число измеряемых параметров (временных рядов)	+	
5.3	Увеличить объем информации, передаваемый на внешние системы	+	
5.4	Реализовать анализ данных в реальном времени	+	
	Передать на реализацию сторонней организации		+

Выводы. Таким образом, востребованность CPS в условиях развития концепции цифровой трансформации компаний обуславливает необходимость их проектирования с учётом специфических факторов предметной области, повышенных требований к системе, в частности, высокой работоспособности, устойчивости, безопасности. Одним из способов оптимизации соотношения затрат и качества проектируемого программного обеспечения CPS является применение метода ФСА к ПО CPS, рассмотренное в данной работе.

Так, были определены функциональные требования к ПО CPS и структура системы, была построена структурно-функциональная схема CPS. Были отражены методики определения значимости функций и стоимости компонентов системы, переноса значимости на компоненты и стоимости на функции. Было проведено сопоставление

стоимости и значимости компонентов ПО CPS при фиксированных функциях системы, в результате чего удалось выявить не самые удачные способы реализации отдельных компонентов, определить более экономичные способы их реализации при одинаковых выполняемых компонентами функциях в условиях большой вариативности доступных решений.

Возможность формировать рекомендации по совершенствованию системы ещё на этапе ее проектирования, до разработки и ввода в эксплуатацию, позволяет избежать необоснованных затрат (как временных, так и материальных) на исправление ошибок или своевременно отказаться от реализации информационной системы ввиду её нерентабельности. Приведенный пример оформления списка рекомендаций по совершенствованию отношения значимость/сложность разрабатываемых компонентов ПО CPS офисного здания может быть использован руководителями проектов, системными архитекторами, специалистами по разработке ПО при поиске решений по увеличению эффективности компонентов ПО CPS и уменьшению затрат.

Библиографический список

1. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues // *Computers in Industry*. – 2018. – № 100. – P. 212–223.

2. Проектирование IoT-платформы для управления энергоресурсами интеллектуальных зданий / А.В. Кычкин, А.И. Дерябин, О.Л. Викентьева, Л.В. Шестакова // *Прикладная информатика – Journal of Applied Informatics*. – 2018. – Т. 13, № 4(76). – С. 29–41.

3. Синтез информационной системы управления подсистемами технического обеспечения интеллектуальных зданий / О.Л. Викентьева, А.И. Дерябин, Л.В. Шестакова, А.В. Кычкин // *Вестник МГСУ*. – 2017. – Т. 12, № 10(109). – С. 1191–1201.

4. Кычкин А.В., Квитко Я.И. Архитектурно-функциональная организация информационной системы управления большими данными в промышленности и энергетике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2018. – № 25. – С. 109–125.

5. A survey: Cyber-physical-social systems and their system-level design methodology / J. Zeng, L.T. Yang, M. Lin, H. Ning, J. Ma // *Future Generation Computer Systems*. – 2016. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.06.034> (дата обращения: 03.01.2019).

6. Lee E.A. *Cyber Physical Systems: Design Challenges* // 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). – 2008. – P. 363–369.

7. Кычкин А.В., Костыгов А.М., Белоногов А.В. Автоматизация удаленного мониторинга энергоэффективности мобильной платформы // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2016. – № 9. – С. 70–76.

8. Костыгов А.М., Кычкин А.В., Борковец К.А. Прогнозирование электропотребления здания на основе селективного выбора нейронной сети // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2017. – № 9. – С. 75–82.

9. Шеремет А.Д., Ковалев А.П. *Функционально-стоимостный анализ: учеб. пособие* / под ред. А.Д. Шеремета. – М.: Изд-во эконом. ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова. – 2017. – С. 13–14.

10. Суслова Л.О., Сивякова М.В. *Функционально-стоимостной анализ как метод оценки инновационного проекта* // *Научный результат. Сер. Экономические исследования*. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 64–68.

11. Зорина Т.Ю., Чернышёва Т.Ю. *Методы оценки эффективности информационных систем* // *Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: сб. науч. тр. II Междунар. конф.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – С. 142–144.

12. Анисифоров А.Б., Анисифорова Л.О. *Методики оценки эффективности информационных систем и информационных технологий в бизнесе: учеб. пособие*. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. – С. 19–75. – URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3876.pdf/download/3876.pdf> (дата обращения: 03.12.2018).

13. Джамай Е.В., Сазонов А.А., Петров Д.Г. Адаптация метода функционально-стоимостного анализа для автоматизации управления предприятием (на примере авиационной промышленности) // *Вестник Гос. ун-та управления*. – 2016. – № 2. – С. 210–212.

14. Ксенофонтова О.Л., Новосельская Н.А. *ABC-XYZ-анализ как средство управления товарным ассортиментом торгового предприятия* //

Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2013. – № 2(34). – С. 70–76.

15. Шатунова Г.А., Кузьмина О.Н. Историко-логический генезис и периодизация этапов развития функционально-стоимостного анализа // Вестник Самар. гос. экон. ун-та. – 2012. – № 4(90). – С. 91–96.

16. Основные положения методики проведения функционально-стоимостного анализа: постановление ГКНТ №259 от 29.06.1982 г. // Экономическая газета. – 1982. – № 28.

17. Моисеев Н.К., Карпунин М.Г. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: учеб. пособие для вузов. – М., 1988.

18. Рождение изобретения (стратегия и тактика решения изобретательских задач) / А.И. Гасанов, Б.М. Гохман, А.П. Ефимочкин, С.М. Кокин, А.Г. Сопельняк. – М: Интерпракс, 1995.

19. Абросимова Е.Б. Функционально-стоимостной анализ как инструмент бережливого производства // Успехи современной науки. – 2016. – Т. 4, № 12. – С. 84–88.

20. Лесина Т.В. Функциональный учет и функциональный анализ инвестиций в автоматизированные информационные системы // Проблемы. Мнения. Решения. Международный бухгалтерский учет. – 2013. – № 7(253). – С. 31–36.

21. Кычкин А.В., Мусихина К.Г., Разепина М.Г. Исследование эффективности создания и внедрения системы энергоменеджмента на промышленном предприятии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 1(9). – С. 66–79.

22. Кычкин А.В., Микрюков Г.П. Метод обработки результатов мониторинга группы энергопотребителей // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2016. – № 6. – С. 9–14.

23. Кычкин А.В., Артемов С.А., Белоногов А.В. Распределенная система энергомониторинга реального времени на основе технологии IoT // Датчики и системы. – 2017. – № 8–9(217). – С. 49–55.

24. Кычкин А.В. Программно-аппаратное обеспечение сетевого энергоучетного комплекса // Датчики и системы. – 2016. – № 7(205). – С. 24–32.

25. Архитектура сетевого управляющего комплекса здания на базе IoT-устройств / А.В. Кычкин, А.И. Дерябин, О.Л. Викентьева, Л.В. Шестакова // Датчики и системы. – 2018. – № 5(225). – С. 32–38.

26. Программно-аппаратный комплекс удаленного мониторинга и анализа энергетических параметров / А.В. Ляхомский, Е.Н. Перфильева, А.В. Кычкин, Н. Генрих // *Электротехника*. – 2015. – № 6. – С. 13–19.

27. ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring / G. Yang, F. Wang, S. Cui, L. Zhao // *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management*. Vol. 2: Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 140. – P. 163–168.

28. Федосов Ю.И. Функционально-идеальное моделирование // ТРИЗ. Практика применения и развитие методических инструментов: сб. докл. IX Междунар. конф.; Москва, 10–11 ноября 2017 г. Т.1: Инструменты постклассической ТРИЗ. – М., 2017. – С. 89–96.

References

1. Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, 2018, no. 100, pp. 212-223.

2. Kychkin A.V., Deriabin A.I., Vikent'eva O.L., Shestakova L.V. Proektirovanie IoT-platforny dlia upravleniia energoresursami intellektual'nykh zdanii [IoT-platform design for smart buildings energy management]. *Prikladnaia informatika - Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 4(76), pp. 29-41.

3. Vikent'eva O.L., Deriabin A.I., Shestakova L.V., Kychkin A.V. Sintez informatsionnoi sistemy upravleniia podsystemami tekhnicheskogo obespecheniia intellektual'nykh zdanii [Synthesis of the information management system for the subsystems of the technical support of intellectual buildings]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2017, vol. 12, no. 10(109), pp. 1191-1201.

4. Kychkin A.V., Kvitko Ia.I. Arkhitekturno-funktsional'naia organizatsiia informatsionnoi sistemy upravleniia bol'shimi dannymi v promyshlennosti i energetike [Architectural and technological organization of the information system for managing large data in industry and energy]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 25, pp. 109-125.

5. Zeng J., Yang L.T., Lin M., Ning H., Ma J. A survey: Cyber-physical-social systems and their system-level design methodology. *Future Generation Computer Systems*. Elsevier, 2016, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.06.034> (accessed 03 January 2019).

6. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges. *11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008, pp. 363-369.

7. Kychkin A.V., Kostygov A.M., Belonogov A.V. Avtomatizatsiia udalennogo monitoringa energoeffektivnosti mobil'noi platformy [Mobile platform energy efficiency automation remote monitoring]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2016, no. 9, pp. 70-76.

8. Kostygov A.M., Kychkin A.V., Borkovets K.A. Prognozirovanie elektropotrebleniia zdaniia na osnove selektivnogo vybora neironnoi seti [Building power consumption forecasting based on the neuron network selective option]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2017, no. 9, pp. 75-82.

9. Sheremet A.D., Kovalev A.P. Funktsional'no-stoimostnyi analiz [Value analysis]. Ed. A.D. Sheremet. Moscow: Ekonomicheskii fakul'tet Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M.V. Lomonosova, 2017, pp. 13-14.

10. Suslova L.O., Siviakova M.V. Funktsional'no-stoimostnoi analiz kak metod otsenki innovatsionnogo proekta [Value analysis as a method of assessment of innovative project]. *Setevoi zhurnal «Nauchnyi rezul'tat»*. Ser. *Ekonomicheskie issledovaniia*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 64-68.

11. Zorina T.Iu., Chernysheva T.Iu. Metody otsenki effektivnosti informatsionnykh sistem [Methods for an assessment of efficiency of information systems]. *Informatsionnye tekhnologii v nauke upravlenii sotsialnoi sfere i meditsine Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnoi konferentsii*. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2015, pp. 142-144.

12. Anisiforov A.B., Anisiforova L.O. Metodiki otsenki effektivnosti informatsionnykh sistem i informatsionnykh tekhnologii v biznese [Methodologies for an assessment of efficiency of information systems and information technologies in business]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 19-75, available at: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3876.pdf/download/3876.pdf> (accessed 03 December 2018).

13. Dzhamai E.V., Sazonov A.A., Petrov D.G. Adaptatsiia metoda funktsional'no-stoimostnogo analiza dlia avtomatizatsii upravleniia predpriatiem (na primere aviatsionnoi promyshlennosti) [Adaptation of a method of the functional and cost analysis for business management automation (on the example of the aviation industry)]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta upravleniia*, 2016, no. 2, pp. 210-212.

14. Ksenofontova O.L., Novosel'skaia N.A. AVS-XYZ - analiz kak sredstvo upravleniia tovarnym assortimentom torgovogo predpriiatiia [ABC and XYZ analysis as mercantile business product assortment management instrument]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2013, no. 2(34), pp. 70-76.

15. Shatunova G.A., Kuz'mina O.N. Istoriko-logicheskie genyzy i periodizatsiia etapov razvitiia funktsional'no-stoimostnogo analiza [Historical and logical origins and the periodization of the stages of development value analysis]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*, 2012, no. 4(90), pp. 91-96.

16. Osnovnye polozeniia metodiki provedeniia funktsional'no-stoimostnogo analiza: Postanovlenie GKNT № 259 ot 29.06.1982 goda [The main provisions of the methodology of value analysis: SCST Decree No. 259 29.06.1982 year]. *Ekonomicheskaiia gazeta*, 1982, no. 28.

17. Moiseev N.K., Karpunin M.G. Osnovy teorii i praktiki funktsional'no-stoimostnogo analiza [Fundamentals of theory and practice of value analysis]. Moscow: 1988.

18. Gasanov A.I., Gokhman B.M., Efimochkin A.P., Kokin S.M., Sopel'niak A.G. Rozhdenie izobreniia (strategiia i taktika resheniia izobretatel'skikh zadach) [Birth of invention (strategy and tactics of inventive problem solving)]. Moscow: Interpraks, 1995.

19. Abrosimova E.B. Funktsional'no-stoimostnoi analiz kak instrument berezhlivogo proizvodstva [Value analysis as a tool of lean production]. *Uspekhi sovremennoi nauki*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 84-88.

20. Lesina T.V. Funktsional'nyi uchet i funktsional'nyi analiz investitsii v avtomatizirovannye informatsionnye sistemy [Functional accounting and functional analysis of investments in automated information systems]. *Problemy. Mneniia. Resheniia. Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchet*, 2013, no. 7(253), pp. 31-36.

21. Kychkin A.V., Musikhina K.G., Razepina M.G. Issledovanie effektivnosti sozdaniia i vnedreniia sistemy energomenedzhmenta na promyshlennom predpriatii [Establishment and implementation effectiveness research of an energy management system at the industrial enterprise]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 1(9), pp. 66-79.

22. Kychkin A.V., Mikriukov G.P. Metod obrabotki rezul'tatov monitoringa gruppy energopotrebitel'ei [Method of processing the result of monitoring the group of energy consumers]. *Energobezopasnost' i energoberezhenie*, 2016, no. 6, pp. 9-14.

23. Kychkin A.V., Artemov S.A., Belonogov A.V. Raspredelennaia sistema energomonitoringa real'nogo vremeni na osnove tekhnologii IoT [Distributed real-time energy monitoring system based on IoT technology]. *Datchiki i sistemy*, 2017, no. 8-9(217), pp. 49-55.

24. Kychkin A.V. Programmno-apparatnoe obespechenie setevogo energouchetnogo kompleksa [Software and hardware of the network energy-accounting complex]. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 7(205), pp. 24-32.

25. Kychkin A.V., Deriabin A.I., Vikent'eva O.L., Shestakova L.V. Arkhitektura setevogo upravliaiushchego kompleksa zdaniia na baze IoT-ustroistv [Architecture of the building management system based on IoT devices]. *Datchiki i sistemy*, 2018, no. 5(225), pp. 32-38.

26. Liakhomskii A.V., Perfil'eva E.N., Kychkin A.V., Genrikh N. Programmno-apparatnyi kompleks udalennogo monitoringa i analiza energeticheskikh parametrov [A software-hardware system of remote monitoring and analysis of the energy data]. *Elektrotekhnika*, 2015, no. 6, pp. 13-19.

27. Yang, G., Wang, F., Cui, S., Zhao, L. ARM and DSP Based Device for Power Quality Monitoring. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management. Vol. 2. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 140, pp. 163-168.

28. Fedosov Iu.I. Funktsional'no-ideal'noe modelirovanie [Functional-ideal modeling]. *TRIZ. Praktika primeneniia i razvitie metodicheskikh instrumentov. Vol. 1. Instrumenty postklassicheskoi TRIZ. Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnoi konferentsii*, 10-11 November 2017. Moscow, 2017, pp. 89-96.

Сведения об авторах

Неганова Эльвира Анатольевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Информационные технологии в бизнесе» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (614070, Пермь, Студенческая, 38, e-mail: neganova.elvira@yandex.ru).

Марквирер Владлена Дмитриевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Информационные технологии в бизнесе» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (614070, Пермь, Студенческая, 38, e-mail: Vladlena_Markvirer@mail.ru).

Плаксин Михаил Александрович (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Информационные технологии в бизнесе» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», доцент кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета (614070, Пермь, Студенческая, 38, e-mail: mapl@list.ru).

Дерябин Александр Иванович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии в бизнесе» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», академический руководитель образовательной программы «Информационная аналитика в управлении предприятием» (614070, Пермь, Студенческая, 38, e-mail: aderyabin@hse.ru).

About the authors

Neganova Elvira Anatolevna (Perm, Russian Federation) is a Master Student department of information technologies in business National Research University Higher School of Economics (614070, Perm, 38, Studencheskaya str., e-mail: neganova.elvira@yandex.ru).

Markvirer Vladlena Dmitrievna (Perm, Russian Federation) is a Master Student department of information technologies in business National Research University Higher School of Economics (614070, Perm, 38, Studencheskaya str., e-mail: Vladlena_Markvirer@mail.ru).

Plaksin Mikhail Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Physics and Mathematics, Associate Professor of the department of information technologies in business of the National Research University Higher School of Economics, Associate Professor of computer science department of Perm State National Research University (614070, Perm, 38, Studencheskaya str., e-mail: mapl@list.ru).

Deryabin Alexander Ivanovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the department of information technologies in business of the National Research University Higher School of Economics, supervisor of the academic programme “Information Analytics in Enterprise Management” (614070, Perm, 38, Studencheskaya str., e-mail: aderyabin@hse.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 519.6

И.А. Седых, А.М. Сметанникова

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОКРЕСТНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ В MATHCAD

Дискретные модели имеют широкое применение в современном мире. Существует множество сложных пространственно-распределенных объектов и систем, таких как транспортные системы, сталеплавильное производство, процесс износа элементов конструкций мостовых сооружений, цементное производство, процесс очистки сточных вод и многие другие. Окрестностные модели применяются для имитационного моделирования сложных производственных систем, а также для управления ими. Именно окрестностные модели обобщают многие дискретные системы. В работе рассмотрены два простейших класса окрестностных моделей, такие как линейные и билинейные динамические дискретные окрестностные модели, которые в данной статье представлены в матричном виде. Также показано основное отличие линейных от билинейных динамических дискретных окрестностных моделей; объясняется, в чем выражена дискретность окрестностных моделей. Даны определения таких понятий, как блочное умножение, параметрическая идентификация и устойчивость окрестностных моделей. Проведена параметрическая идентификация рассмотренных динамических дискретных окрестностных моделей, приведены формулы переопределенной системы линейных алгебраических уравнений для выполнения параметрической идентификации окрестностных систем. В работе рассмотрено характеристическое уравнение динамических дискретных окрестностных моделей, по которому находятся собственные числа, необходимые для определения устойчивости. Описано условие устойчивости для дискретных динамических окрестностных моделей по критерию Ляпунова. По результатам устойчивости и адекватности окрестностной модели производственной пространственно-распределенной системы можно судить о возможности применения данной модели для прогнозирования ее состояний. Была разработана программа для построения и исследования дискретных динамических окрестностных моделей на устойчивость по критерию Ляпунова. Данная программа была выполнена в блоке программирования математического пакета Mathcad. Представлена блок-схема алгоритма программы, в которой показана последовательность выполнения операций для проведения параметрической идентификации и изучения линейных и билинейных дискретных окрестностных моделей на устойчивость по критерию Ляпунова. Подробно описаны основные шаги и команды в среде Mathcad, которые были использованы в ходе написания программного кода.

Ключевые слова: линейные и билинейные окрестностные модели, параметрическая идентификация, устойчивость, критерий Ляпунова, программа, среда Mathcad.

I.A. Sedykh, A.M. Smetannikova

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

CONSTRUCTION AND INVESTIGATION OF DISCRETE DYNAMIC NEIGHBORHOOD MODELS IN MATHCAD

Discrete models are widely used in the modern world. There are many complex spatially distributed objects and systems, such as transport systems, steelmaking, the wear process of structural elements of bridge structures, cement production, the process of wastewater treatment, and many others. Neighborhood models are used to simulate complex production systems, as well as to manage them. It is the neighborhood models that generalize many discrete systems. In the paper, two simplest classes of neighborhood models are considered, such as linear and bilinear dynamic discrete neighborhood models, which in this paper are presented in a matrix form. The main difference between linear and bilinear dynamic discrete neighborhood models is also shown; explains the discreteness of the neighborhood models. Definitions of such concepts as block multiplication, parametric identification and stability of neighborhood models are given. Parametric identification of the considered dynamic discrete neighborhood models is carried out, formulas for an overdetermined system of linear algebraic equations for performing parametric identification of neighborhood systems are given. The characteristic equation of dynamical discrete neighborhood models is considered in which the eigenvalues necessary for determining stability are found. The stability condition for discrete dynamical neighborhood models is described by the Lyapunov criterion. Based on the results of the stability and adequacy of the neighborhood model of the production spatially-distributed system, one can judge the possibility of using this model for forecasting its states. A program was developed for constructing and investigating discrete dynamic neighborhood models for stability by the Lyapunov criterion. This program was implemented in the programming block of the mathematical package Mathcad. A block diagram of the program algorithm is presented, which shows the sequence of operations for parametric identification and study of linear and bilinear discrete neighborhood models for stability by the Lyapunov criterion. The main steps and commands in the Mathcad environment that were used during the writing of the program code are described in detail.

Keywords: linear and bilinear neighborhood models, parametric identification, stability, Lyapunov's criterion, program, environment Mathcad.

Введение. Окрестностное моделирование применяется для исследования и изучения пространственно-распределенных систем [1–3]. Динамика окрестностных моделей выражается в изменении состояний модели с течением времени [4–5]. В работе рассмотрены линейные и билинейные дискретные динамические окрестностные модели [6–13].

Приведенные два простейших класса окрестностных моделей в работе исследуются на устойчивость по критерию Ляпунова с помощью разработанной в блоке программирования математического пакета Mathcad программы.

1. Линейная и билинейная окрестностные модели. Линейные окрестностные системы являются простейшим классом окрестностного моделирования, с которого началась разработка окрестностных моделей. Далее изучались нелинейные системы, простейшим случаем которых являются билинейные окрестностные модели.

Далее в (1) и (2) покажем формулы линейной и билинейной окрестностных моделей соответственно:

$$X[t+1, i] = A_i + B_i \cdot V[t, i] + C_i \cdot X[t, i], \quad (1)$$

где $A_i \in R^{m \times 1}$, $B_i, C_i \in R^{m \times m}$ – матрицы-параметры, $X[t, i] \in R^m$ – состояния модели, $V[t, i] \in R^m$ – входы модели, $i = 1, \dots, n$ – количество узлов модели.

$$X[t+1, i] = A_i + B_i \cdot V[t, i] + C_i \cdot X[t, i] + E_i \circ X[t, i] \cdot V[t, i], \quad (2)$$

где $E_i \in R^{m \times m \times m}$, $E_i \circ X[t, i] \cdot V[t, i]$ – блочное умножение.

Основное отличие линейной от билинейной окрестностной модели в том, что в линейном случае отсутствует блочное умножение.

2. Параметрическая идентификация окрестностных моделей.

Параметрическая идентификация заключается в нахождении параметров заданной окрестностной модели. Для параметрической идентификации окрестностных моделей необходимо решить переопределенную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида $AX_i = B_i$ для i -го узла [14–18], где:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & v_1[t, 1] & \dots & v_1[t, n] & x_1[t, 1] & \dots & x_1[t, n] \\ 1 & v_2[t, 1] & \dots & v_2[t, 1] & x_2[t, 1] & \dots & x_2[t, n] \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & v_M[t, 1] & \dots & v_M[t, 1] & x_M[t, 1] & \dots & x_M[t, n] \end{bmatrix},$$

$$X_i = \begin{bmatrix} g_c[i] \\ g_v[1, i] \\ \dots \\ g_v[n, i] \\ g_x[1, i] \\ \dots \\ g_x[n, i] \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} x_1[t+1, i] \\ x_2[t+1, i] \\ \dots \\ x_M[t+1, i] \end{bmatrix},$$

где $v_k[t, i]$ – входные данные модели для k -й строчки обучающей выборки; $x_k[t, i]$ – состояния i -го узла модели для k -й строчки обучающей выборки; $g_h[j, i]$ – коэффициенты функции пересчета состояний модели; M – количество реализаций всех $x_k[t, i]$, $v_k[t, i]$ в некоторый

текущий момент времени t и $x_k[t+1, i]$ в следующий момент времени $t+1$, $k=1, \dots, M$, $i=1, \dots, n$, $j=1, \dots, n$, $h=\{c, v, x\}$.

В билинейном случае матрицы A, X_i изменяются, в них добавляются произведения состояний модели на входы и соответствующие им коэффициенты.

3. Условие устойчивости дискретных окрестностных моделей.

Устойчивость – способность системы стремиться из различных начальных состояний к некоторому равновесному состоянию. Исследование устойчивости дискретных динамических окрестностных моделей по Ляпунову сводится к изучению расположения корней характеристического уравнения замкнутой динамической дискретной системы относительно единичной окружности.

Покажем характеристическое уравнение дискретной системы:

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x^1 + a_0 = 0, \quad (3)$$

где n – порядок системы, a_i – коэффициенты характеристического уравнения, x – собственные числа, $i=0, \dots, n$ [19–20].

Чтобы динамическая дискретная окрестностная модель была устойчивой по критерию Ляпунова, необходимо составить матрицы для каждого узла окрестностной модели, найти собственные числа характеристического уравнения. Если собственные числа характеристического уравнения каждого узла по модулю меньше единицы, то данная система будет устойчива по критерию Ляпунова.

4. Программа для построения и исследования окрестностных моделей. В данной работе описывается программа для построения и исследования дискретных динамических окрестностных моделей на устойчивость, которая была выполнена в блоке программирования математического пакета Mathcad. На рисунке представлена блок-схема алгоритма программы, на которой показана последовательность выполнения шагов.

С помощью данной программы можно проводить параметрическую идентификацию и проверять на устойчивость два класса окрестностных моделей, а именно линейные и билинейные динамические окрестностные модели. Для того чтобы проверить на устойчивость линейную или билинейную динамическую окрестностную модель, вначале необходимо прописать в программе путь из файла Excel формата

.xlsx к рассматриваемой окрестностной модели, который задан в качестве переменной $Path$. Зададим циклы по номеру узлов i и номеру координат вектора состояний j . Далее считываем из файла Excel матрицы D и F , для этого существует команда $submatrix()$, определяющая границы матриц, которые необходимо использовать для дальнейших вычислений.

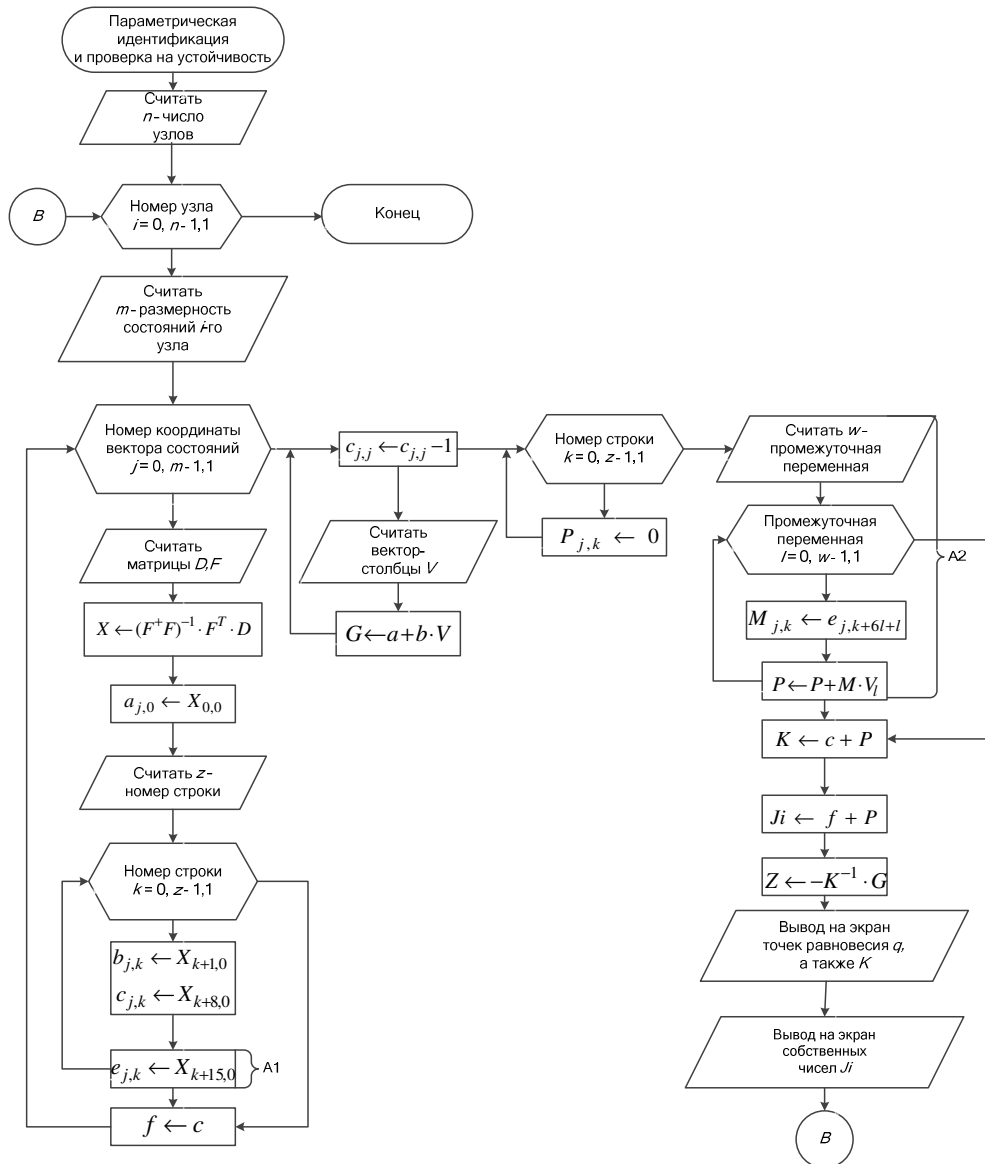


Рис. Блок-схема алгоритма программы

Вычисляем вектор-столбец X для всех параметров каждого узла по формуле $X \leftarrow (F^T F)^{-1} \cdot F^T D$. Затем производим разбиение вектор-столбца X на части по формулам (2) и (3), т.е. выделяем матрицы a, b, c, e . Отличие в проверке на устойчивость линейной динамической окрестностной модели от билинейной окрестностной модели в том, что в линейном случае отсутствует блочное умножение, т.е. составляем матрицы a, b, c из вектора X . Блочная часть « e » в линейном случае обнуляется. В данной программе блоки $A1, A2$ – это условия блочного умножения, которые выполняются только для билинейной окрестностной модели.

Системы уравнений дискретных линейных и билинейных динамических окрестностных моделей с пятью узлами в общем виде имеют вид (31) и (32). Присваиваем $f \leftarrow c$, чтобы сохранить исходную матрицу « c » для дальнейшего вычисления собственных чисел матрицы Якоби для каждого узла. Для нахождения точек равновесия линейной или билинейной окрестностной модели необходимо приравнять систему к нулю. В программе Mathcad производим замену $c_{j,j} \leftarrow c_{j,j} - 1$. Далее упрощаем формулы (2) и (3) следующим образом:

1. Вводим переменную $G \leftarrow a + bV$, где V – вектор управлений, a, b – матрицы.

2. Вводим переменную M , которая содержит все семь блоков каждой матрицы E_i , представленной в виде $E_i = [E_{i1} \ E_{i2} \ \dots \ E_{i7}]$, где i – номер узла.

3. Вводим промежуточную матрицу $P = M \cdot V_i$, где V_i – число. Затем матрице P присваивается следующее значение: $P \leftarrow P + M \cdot V_i$.

Для нахождения точек равновесия вычислим матрицу K , которая в линейном и билинейном случае будет следующей: $K \leftarrow c + P$. Найдём точки равновесия q для каждого узла путем решения формулы $Z \leftarrow -K^{-1}G$ и сохраним результаты в файле Excel, используя следующий синтаксис $q \leftarrow \text{WRITEEXCEL}(Z, \text{Path}, \text{concat}("x", \text{num2str}(i+1), "!"))$, который означает, что для каждого узла переменная Z сохраняется в файле Excel по заданному пути Path и записывается в лист « xi ». Функция $\text{concat}("x", \text{num2str}(i+1), "!")$ в блоке программирования Mathcad обозначает название листа в файле Excel, где запись "x", num2str(i+1), "!" – это лист « xi ».

Чтобы проверить модели на устойчивость, необходимо найти собственные числа для каждой точки равновесия линейной и билинейной динамических окрестностных моделей с помощью встроенной в Mathcad функции *eigenvals* (J_i), где $J_i \leftarrow f + P$ – матрица Якоби для каждого узла i . Согласно критерию Ляпунова для проверки устойчивости дискретных динамических окрестностных моделей система устойчива, если собственные числа для каждого узла будут по модулю меньше единицы.

Выводы. Таким образом, рассмотрены линейные и билинейные окрестностные модели, выполнена их параметрическая идентификация. Произведено исследование линейных и билинейных дискретных динамических окрестностных моделей на устойчивость по критерию Ляпунова.

Была реализована программа в Mathcad для параметрической идентификации и проверки окрестностных моделей на устойчивость. Данная программа позволяет разрабатывать и исследовать линейные и билинейные окрестностные модели. С помощью представленной программы можно проводить изучение свойств пространственно-распределенных объектов и процессов сложных производственных систем. В дальнейшем планируются рассмотрение вопроса управления динамическими окрестностными моделями и его программная реализация.

Библиографический список

1. Shmyrin A., Sedykh I. Neural Networks Neighborhood Models // Global Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 12, № 6. – P. 5039–5046.
2. Седых И.А. Окрестностные производственные сети // XVII Междунар. науч. чтения (памяти В.К. Зворыкина): сб. ст. междунар. науч.-практ. конф.; 1 ноября 2017 г., г. Москва. – М.: ЕФИР, 2017. – С.16–19.
3. Шмырин А.М., Мишачёв Н.М. Окрестностные системы и алгоритм Качмажа // Вестник Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – Вып. 6. – С. 2113–2120.
4. Седых И.А. Управление динамическими окрестностными моделями с переменными окрестностями // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – № 1(71). – С. 18–23.
5. Shmyrin A., Sedykh I. A Measure of the Non-Determinacy of a Dynamic Neighborhood Model // Systems. – 2017. – 5(49). DOI: 10.3390/systems5040049

6. Седых И.А., Сметанникова А.М. Применение генетических алгоритмов для параметрической идентификации линейных и нелинейных динамических окрестностных моделей // Летняя школа молодых ученых ЛГТУ – 2017: сб. трудов науч.-практ. конф. студ. и аспирантов. Липецк, 2018. – С. 44–47.

7. Шмырин А.М., Седых И.А. Классификация билинейных окрестностных моделей // Вестник Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17. – Вып. 5. – С. 1366–1369.

8. Шмырин А.М., Седых И.А., Щербаков А.П. Общие билинейные дискретные модели // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 10. – Вып. 3–1. – С. 44–49.

9. Шмырин А.М., Седых И.А. Дискретные модели в классе окрестностных систем // Вестник Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2012. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 867–871.

10. Седых И.А. Окрестностное моделирование мультиагентных систем // Вестник Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – Вып. 5–2. – С. 2667–2668.

11. Седых И.А. Параметрическая идентификация линейной динамической окрестностной модели // Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – С. 12–19.

12. Седых И.А., Сметанникова А.М. Решение СЛАУ с помощью генетического алгоритма // Тенденции развития современной науки: сб. тез. докл. науч. конф. студ. и аспирантов. ЛГТУ. Ч. 2. – Липецк, 2017. – С. 233–236.

13. Екатеринчук Е.Д., Ряшко Л.Б. Анализ стохастических аттракторов квадратичной дискретной популяционной модели с запаздыванием // Компьютерные исследования и моделирование. – 2015. – Т. 7. – Вып. 1. – С. 145–157.

14. Седых И.А., Сметанникова А.М. Применение пакета MatLab для параметрической идентификации окрестностных моделей на основе генетических алгоритмов // Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2017. – С. 24–29.

15. Седых И.А., Сметанникова А.М. Параметрическая идентификация окрестностной модели с помощью генетического алгоритма и псевдообращения // Интерактивная наука. – 2017. – Т. 4. – Вып. 14. – С. 113–116.

16. Седых И.А. Идентификация и управление динамическими окрестностными моделями // Современные сложные системы управления (HTCS'2017): материалы XII Междунар. науч.-практ. конф.; 25–27 октября 2017 г.: в 2 ч. Ч. 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2017. – С. 138–142.

17. Shmyrin A., Sedykh I. Identification and control algorithms of functioning for neighborhood systems based on petri nets // Automation and Remote Control. – 2010. – Vol. 71, № 6. – P. 1265–1274.

18. Окрестностное моделирование процесса очистки сточных вод / А.М. Шмырин, И.А. Седых, А.М. Сметанникова, Е.Ю. Никифорова // Вестник ТГУ. Сер. Естественные и технические науки. – 2017. – Т. 22. – Вып. 3. – С. 596–604.

19. Седых И.А., Сметанникова А.М. Проверка устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук; 17 ноября 2017 г. – Липецк, 2017. – С. 125–129.

20. Седых И.А., Сметанникова А.М. Критерий Гурвица для проверки устойчивости линейных динамических окрестностных моделей процесса очистки сточных вод // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза: Изд-во Пензен. гос. технолог. ун-та, 2018. – Т. 7, № 1(41). – С. 67–71.

References

1. Shmyrin A., Sedykh I. Neural Networks Neighborhood Models. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 5039-5046.

2. Sedykh I.A. Okrestnostnye proizvodstvennye seti [Neighboring production networks]. *XVII Mezhdunarodnye nauchnye chteniia (Pamiati V.K. Zvorykina). Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 1 November 2017. Moscow, EFIR, 2017, pp. 16-19.

3. Shmyrin A.M., Mishachev N.M. Okrestnostnye sistemy i algoritm Kachmazha [Surrounding systems and Kachmazh's algorithm]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2016, vol. 21, iss. 6, pp. 2113-2120.

4. Sedykh I.A. Upravlenie dinamicheskimi okrestnostnymi modeliami s peremennymi okrestnostiami [Control of dynamic neighborhood models with variable neighborhoods]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2018, no. 1(71), pp. 18-23.

5. Shmyrin A., Sedykh I. A Measure of the Non-Determinacy of a Dynamic Neighborhood Model. *Systems*, 2017, vol. 5, iss. 4. DOI: 10.3390/systems5040049

6. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Primenenie geneticheskikh algoritmov dlia parametricheskoi identifikatsii lineinykh i nelineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei [Application of genetic algorithms for the parametric identification of linear and nonlinear dynamic neighborhood models]. *Letniiaia shkola molodykh uchenykh LGTU-2017. Sbornik trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Lipetsk, 2018, pp. 44-47.

7. Shmyrin A.M., Sedykh I.A. Klassifikatsiia bilineinykh okrestnostnykh modelei [Classification of bilinear neighborhood models]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, vol. 17, iss. 5, pp. 1366-1369.

8. Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Shcherbakov A.P. Obshchie bilineinye diskretnye modeli [General bilinear discrete models]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, vol. 10, iss. 3-1, pp. 44-49.

9. Shmyrin A.M., Sedykh I.A. Diskretnye modeli v klasse okrestnostnykh sistem [Discrete models in the class of neighborhood systems]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, vol. 17, iss. 3, pp. 867-871.

10. Sedykh I.A. Okrestnostnoe modelirovanie mul'tiagentnykh sistem [Neighborhood modeling of multi-agent systems]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2013, vol. 18, iss. 5-2, pp. 2667-2668.

11. Sedykh I.A. Parametricheskaiia identifikatsiia lineinoi dinamicheskoi okrestnostnoi modeli [Parametric identification of linear dynamic neighborhood model]. *Innovatsionnaia nauka: proshloe, nastoiashchee, budushchee. Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Ufa: AETERNA, 2016, pp. 12-19.

12. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Reshenie SLAU s pomoshch'iu geneticheskogo algoritma [The solution of systems of linear equations using a genetic algorithm]. *Tendentsii razvitiia sovremennoi nauki. Sbornik tezisov dokladov nauchnoi konferentsii studentov i aspirantov LGTU*. Lipetsk, 2017, part. 2, pp. 233-236.

13. Ekaterinchuk E.D., Riashko L.B. Analiz stokhasticheskikh attraktorov kvadrachnoi diskretnoi populiatsionnoi modeli s zapazdyvaniem [Analysis of stochastic attractors of quadratic discrete population model with delay]. *Komp'uternye issledovaniia i modelirovanie*, 2015, vol. 7, iss. 1, pp. 145-157.

14. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Primenenie paketa MatLab dlia parametriceskoi identifikatsii okrestnostnykh modelei na osnove geneticheskikh algoritmov [Application of the MatLab package for parametric identification of neighborhood models based on genetic algorithms]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, pp. 24-29.

15. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Parametriceskaia identifikatsiia okrestnostnoi modeli s pomoshch'iu geneticheskogo algoritma i psevdobrashcheniia [Parametric identification of the neighborhood model by means of a genetic algorithm and pseudo-inversion]. *Interaktivnaia nauka*, 2017, vol. 4, iss. 14, pp. 113-116.

16. Sedykh I.A. Identifikatsiia i upravlenie dinamicheskimi okrestnostnymi modeliami [Identification and management of dynamic neighborhood models]. *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniia (HTCS'2017). Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 25-27 October 2017. Part 1. Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2017, pp. 138-142.

17. Shmyrin A., Sedykh I. Identification and control algorithms of functioning for neighborhood systems based on petri nets. *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 6, pp. 1265-1274.

18. Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Smetannikova A.M., Nikiforova E.Iu. Okrestnostnoe modelirovanie protsessa ochistki stochnykh vod [Surrounding modeling of sewage treatment process]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2017, vol. 22, iss. 3, pp. 596-604.

19. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Proverka ustoichivosti lineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei protsessa ochistki stochnykh vod [Verification of the stability of linear dynamic neighborhood models of wastewater treatment]. *Materialy oblastnogo profilnogo seminara "Shkola molodykh uchenykh" po problemam tekhnicheskikh nauk*, 17 November 2017, Lipetsk, 2017, pp. 125-129.

20. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. Kriterii Gurvitsa dlia proverki ustoichivosti lineinykh dinamicheskikh okrestnostnykh modelei protsessa ochistki stochnykh vod [Hurwitz criterion for testing the stability of linear

dynamic neighborhood models of wastewater treatment]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoiashchego plius*. Penza: Penzenskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2018, vol. 7, no. 1(41), pp. 67-71.

Сведения об авторах

Седых Ирина Александровна (Липецк, Россия) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Липецкого государственного технического университета (398055, Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: sedykh-irina@yandex.ru).

Сметанникова Анастасия Михайловна (Липецк, Россия) – студентка Липецкого государственного технического университета (398055, Липецк, ул. Московская, 30, e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru).

About the authors

Sedykh Irina Aleksandrovna (Lipetsk, Russian Federation) is a Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor Department of Higher Mathematics Lipetsk State Technical University (398055, Lipetzck, 30, Moskovskaya str., e-mail: sedykh-irina@yandex.ru).

Smetannikova Anastasiya Mikhailovna (Lipetsk, Russian Federation) is a Student Lipetsk State Technical University (398055, Lipetzck, 30, Moskovskaya str., e-mail: n.smetannickowa@yandex.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 004.93

А.И. Тур¹, А.Н. Кокоулин¹, А.В. Дзыгарь²¹Пермский Национальный Исследовательский Университет, Пермь, Россия²ООО «Фейспасс», Пермь, Россия

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОИСКА И РАСПОЗНАВАНИЯ ШТРИХКОДА НА ПОВРЕЖДЁННОЙ ТАРЕ В АВТОМАТЕ РАЗДЕЛЬНОГО СБОРА ОТХОДОВ

Предложено решение задачи модернизации автомата по приёму использованной тары. Это вызвано необходимостью повышения конкурентоспособности разрабатываемой конструкции. Предложен вариант решения, основанный на иерархическом автоматическом распознавании штрихового кода на боковой поверхности тары. Для его реализации рассмотрены алгоритмы считывания и восстановления штрихового кода.

Для считывания предложен как обычный метод распознавания штриховых кодов, так и его модификация, использующая нейронную сеть. Задача модифицированного метода заключается в предварительной разметке изображения и дальнейшем сопоставлении участков их возможным значениям. Рассмотрены преимущества и недостатки данных методов.

Для восстановления информации повреждённых штриховых кодов предложены три метода: «восстановление за счёт избыточности», «восстановление за счёт угадывания элемента мажоритарной системой» и «восстановление за счёт аналитического расчёта по контрольной сумме». Рассмотрены преимущества и недостатки данных методов.

Описанные методы структурированы в единый иерархический алгоритм распознавания штрихового кода. Полученный алгоритм актуален для условий ограниченных вычислительных мощностей микроконтроллера, применяемого в автомате. Он позволяет избежать большого количества операций по распознаванию штрихового кода в случае, если бы применялся режим поиска штрихового кода в реальном времени, заменяя их единичными вызовами простых алгоритмов. Происходит экономия ресурсов памяти, так как наиболее ресурсоёмкая часть (распознавание штрихового кода) выполняется не над большим комплексным изображением боковой поверхности тары, а над его отдельными фрагментами. Последний факт также положительно влияет на эффективность и время распознавания.

Ключевые слова: автомат по приёму тары, переработка бытовых отходов, искусственная нейронная сеть, штриховой код, иерархическое распознавание.

A.I. Tur¹, A.N. Kokoulin¹, A.V. Dzygar²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²ООО “FacePass”, Perm, Russian Federation

HIERARCHICAL BARCODE DETECTION AND RECOGNITION SYSTEM FOR DAMAGED CONTAINERS IN REVERSE VENDING MACHINES

In this article, the authors propose a solution to the problem of upgrading the machine for receiving containers. This is caused by the need to increase the competitiveness of the proposed design. A solution is based on a hierarchical automatic recognition of a bar code on the side surface of the container. For its implementation, algorithms for reading and restoring bar codes are considered.

Both the usual barcode recognition method and its modification using a neural network are proposed for barcode detection. The task of the modified method is to pre-mark the image and further comparison of the plots to their possible values. The advantages and disadvantages of these methods are considered.

To restore the information of damaged barcodes, three methods were proposed – “recovery by redundancy”, “recovery by guessing an element by the majority system” and “recovery by analytic calculation of the checksum”. The advantages and disadvantages of these methods are considered.

The described methods are structured into a single hierarchical bar code recognition algorithm. The resulting algorithm is relevant for the conditions of limited computing power of the microcontroller used in the machine. It allows you to avoid a large number of operations on the recognition of a bar code, if the barcode search mode were used in real time, replacing them with single calls of simple algorithms. There is a saving of memory resources, because the most resource-intensive part (bar code recognition) is performed not over a large complex image of the side surface of the container, but over its individual fragments. The latter fact also has a positive effect on the efficiency and recognition time.

Keywords: reverse vending machine, recycling, artificial neural network, barcode, hierarchical recognition.

Введение. На сегодняшний день весьма актуален вопрос сортировки бытовых отходов населения. Наша команда занимается одним из возможных вариантов решения данной проблемы – разработкой Reverse vending machine (дословно «обратный торговый автомат», автомат по приёму тары, RVM). Это автомат, позволяющий людям возвращать пустые контейнеры для напитков (бутылки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и алюминиевые банки) для переработки. Принцип работы автомата основан на возврате конечному пользователю суммы, эквивалентной стоимости сданной тары. Это и делает его «реверсивным» торговым автоматом – вместо того, чтобы получать контейнер с содержимым за деньги, пользователь получает деньги за сданную тару.

Одни из первых автоматов по приёму тары (аппаратно-программный комплекс «Фандомат») появились на улицах Москвы в 2004 г. «Фандомат» представлял собой корпус, в котором размещены

отсек распознавания с устройством, собирающим информацию о распознаваемом предмете (сканер штриховых кодов), идентификация тары происходит путем сканирования штрихового кода (штрихкода) на этикетке тары и сравнения его с базой принимаемых контейнеров (в базе около 30 тыс. штрихкодов). К недостаткам их устройства можно отнести низкую скорость принятия решения и отсутствие возможности принятия деформированной тары из-за невозможности считывания штрихкода. Эти проблемы было предложено решить за счёт изменения принципа распознавания – распознавание внешнего вида тары с помощью видеокамер и нейронной сети.

Нейронная сеть обучается на фотографиях банок и ПЭТ-бутылок (ПЭТ – полиэтилентерефталат) различных форм и определяет основные функции, необходимые для классификации. Благодаря этой особенности любое новое изображение ПЭТ-бутылки может быть идентифицировано как совокупный класс ПЭТ-бутылок, если контейнер обладает соответствующими свойствами. Банки обрабатываются аналогичным образом. Даже если контейнер механически поврежден и имеет нестандартную форму, то он может быть идентифицирован как один из описанных классов [1]. Согласно тестам распознавание тары при помощи нейронных сетей является более быстрым по сравнению с заявленными характеристиками «Фандомата». В ходе тестирования автомата была настроена нейронная сеть, способная идентифицировать тару по 3 классам – «бутылка ПЭТФ», «алюминиевая банка», «другое» [2, 3].

Но чтобы быть конкурентно способным на рынке RVM, автомат должен иметь возможность более точной идентификации производителя контейнера, так как производители часто заключают контракты на переработку своей тары [4, 5]. Поэтому было принято решение о разработке модификации предложенного отсека распознавания.

В качестве уникального (для каждого производителя) идентификатора был выбран штрихкод, так как он не изменяется в течение продолжительного времени для конкретных товаров любого производителя. Этикетку (бумажная наклейка на ПЭТФ-бутылке или окрашенная боковая поверхность алюминиевой банки) производители часто меняют в угоду осовременивания дизайна контейнеров, что требует частого технического обслуживания автомата для обновления базы образов распознаваемых классов, что негативно может отразиться на итоговой себестоимости и эксплуатационных расходах автомата и приведёт к нерентабельности данного проекта.

Использование штрихового кода для идентификации возможно с применением используемых камер и нейронной сети. Однако нужно сохранить преимущества работы нашего автомата («любое новое изображение ПЭТФ-бутылки или алюминиевой банки может быть идентифицировано как совокупный класс, если контейнер обладает соответствующими свойствами», и «механически поврежденный контейнер, имеющий нестандартную форму, или без некоторых частей может быть идентифицирован как один из описанных классов»). Поэтому для работы со штрихкодами необходимо решить две задачи, которые будут являться дополнительными к разработанной модели:

- поиск и распознавание информации штрихкода;
- восстановление информации повреждённого штрихового кода.

1. Поиск и распознавание штрихового кода. Штрихкод – графическая информация о товаре в виде последовательности штрихов и пробелов различной ширины и нескольких цифр, расположенных под ними (пример представлен на рис. 1). Код наносится на поверхность самого изделия, на этикетку или упаковку. Он содержит информацию о товаре и его производителе.



Рис. 1. Пример штрихкода EAN-13



Рис. 2. Пример распознавания 13-разрядного европейского штрихкода EAN-13

Штрихкод размещается в пространстве, которое слева и справа ограничено 3 штрихами – два темных и один светлый между ними (101). Между ними с помощью модулей зашифровано 13 цифр (для EAN-13). Общее число модулей, используемых для записи, – 84. Пространство, занятое самим штрихкодом, делится на две группы – левую и правую, по 6 цифр в каждой. Эти группы разделяются специальной средней разделительной полосой, которая состоит из 5 модулей – 3 светлых и 2 темных (код 01010). Каждая цифра штрих-кода кодируется 7 модулями. Система кодировки сделана так, чтобы каждая цифра изображалась только 4 утолщенными штрихами. Благодаря этому вся метка штрихкода будет состоять из 29 светлых и 30 темных модулей, включая ограждающие и среднюю разделительную полосы.

Задача считывания штрихового кода заключается либо в распознавании модулей, либо цифр под ними. Существует достаточно большой ряд алгоритмов, позволяющих проводить данные манипуляции. Это могут быть как специализированные библиотеки (Zbar), так и нейронные сети.

ZBar – это библиотека с открытым исходным кодом для считывания штрихкодов как из видеопотока, так и из отдельных изображений. На рис. 2 приведён пример распознавания штрихкода. Программа может отобразить рамки распознанного штрихового кода и вывести считанную информацию. Полученная числовая последовательность проверяется на соответствие акционной базе. В случае обнаружения совпадения автоматом принимается решение о выдаче вознаграждения. Иной подход можно реализовать в нейронных сетях. На данный момент существует уже много решений, позволяющих считывать печатные символы (в том числе и на базе TensorFlow, применяемой в нашем автомате [1–3]). Задача же считывания модулей заключается в написании алгоритма, выполняющего предварительную разметку изображения штрихового кода, и дальнейшем сопоставлении участков с их возможными значениями.

Алгоритм разметки опирается на боковые ограничивающие модули, высчитывая их единичную ширину. На вход нейронной сети поступает последовательность фрагментов изображения, на которых должен находиться модуль (из-за искривленной поверхности тары фрагмент может содержать в себе фрагменты соседних модулей). Происходит определение того, насколько фрагмент соответствует цвету модуля, выстраивается последовательность распознанных значений (в виде комбинации 0 и 1). На следующем этапе анализируется написание групп модулей для определения расположения штрихового кода в пространстве (штрихкод может быть перевернут, но особенности кодирования позволяют это определить) и вычисления первой цифры. Далее по группам модулей распознаются остальные цифры кода.

Однако подобные решения очень требовательны к качеству считываемого изображения: не должно быть лишних деталей, штрихкод должен быть расположен в фокусе, быть достаточно большим [6]. Данную проблему можно решить двумя путями:

- нанести с внешней стороны на тароприёмник маркировку, указывающую пользователю линию в пространстве, где должен находиться штриховой код помещённой тары;

– сделать автоматическую подсистему нахождения штрихкода на таре.

Первый подход достаточно прост, но может вызвать ряд неудобств у пользователя, чем вызовет негативное отношение к проводимой акции. Второй подход осложнён тем, что размещение штрихкода на таре не регламентировано, и потому производитель может его разместить в любом месте и под любым углом к оси вращения тары. Кроме того, внешний вид тоже может быть видоизменён (примеры представлены на рис. 3). Однако штрихкоды всегда помещаются на белом прямоугольном фоне. Этот признак можно использовать для усовершенствования работы предложенного алгоритма.



Рис. 3. Примеры нестандартных вариантов штрихкода EAN-13

Для этой части задачи логично использовать быстрый и нетребовательный алгоритм. В его работе допустимы ошибки, так как он выполняет только грубый поиск объекта на изображении. Поэтому был выбран алгоритм поиска на основе каскадов Хаара, который выполняет поиск прямоугольного белого объекта с полосками [7–11].

2. Восстановление информации повреждённого штрихового кода. Другой проблемой данного подхода может быть невозможность считывания штрихкода из-за его повреждений (загрязнение, царапины, надрывы и тому подобное). Для решения этой проблемы можно применить 3 метода восстановления:

- восстановление за счёт избыточности;
- восстановление с некоторой долей вероятности за счёт «угадывания»;
- восстановление с некоторой долей вероятности за счёт аналитического расчёта.

При восстановлении за счёт избыточности, в случае, когда не удастся считать информацию из модулей или цифр, можно применить совместное распознавание. Данное решение не требует значительного

увеличения объёма памяти и времени обработки. Скрипты запуска считывания будут запускаться последовательно друг за другом, обрабатывая одно и то же изображение, полученное по средствам иерархического поиска.

Получаемый результат не будет носить вероятностный характер, однако действителен только в случаях, когда в коде имеется неповреждённая группа модулей, соответствующая повреждённой цифре, или, наоборот, – неповреждённая цифра, соответствующая повреждённой группе модулей. В противном случае восстановление невозможно и необходимо применять один из двух других методов, дающих вероятностный ответ.

При восстановлении за счёт «угадывания» происходит распознавание нейронной сетью составных частей штрихового кода (модулей или цифр), как уже было описано выше, но с большим отклонением в вероятности распознавания. Другими словами, применяется мажоритарная система, выносящая вердикт о распознаваемом объекте на основе процента похожести объекта на распознаваемые классы. Очевидно, что повреждённая цифра 8 будет иметь достаточно большую корреляцию с классами «0», «6» и «8» и более низкую со всеми остальными (для модулей аналогично, но с определением цвета – «тёмный» и «светлый»). Таким образом, система получит несколько вариантов штрихкода, которые возможны и требуют дополнительной проверки. Проверка может выполняться либо по обнаружению одного из вариантов кода в базе (обнаружение с большой вероятностью ошибки), либо по расчёту контрольной суммы штрихкода и сравнения её с последней цифрой (более защищённый от ошибок способ, но требующий значительно больше вычислительных мощностей).

При восстановлении за счёт аналитического расчёта происходит вычисление возможных вариантов штрихкода на основе контрольной цифры, как и в варианте проверки штрихового кода выше, однако он реализуем, только когда контрольная цифра не повреждена. Для этого рассчитывается контрольная сумма известных чисел и проверяется на совпадение с контрольной цифрой в конце кода. Оставшиеся (не распознанные цифры) рассчитываются на основе разницы первых двух полученных значений. Подобный метод может давать как единственное возможное решение, так и набор возможных кодов, удовлетворяющих условиям. Дальнейшая проверка сводится к сопоставлению полученных кодов с базой.

3. Алгоритм иерархического распознавания штрихкода. Суть модификации автомата по приёму тары заключается в поэтапном иерархическом уточнении информации [12–16] о распознаваемой таре. Конструкция приёмного отделения автомата будет оснащена валиком для поворота принятой тары (в горизонтальном исполнении отсека) или поворотной площадкой (в вертикальном исполнении отсека).

Алгоритм распознавания преобразуется к следующему виду:

1) процесс обнаружения тары в отсеке распознавания и фиксация её формы являются начальным шагом в данном алгоритме. До того момента, пока автомат не обнаружит предмет в отсеке распознавания, он находится в режиме ожидания [2, 3];

2) проверка принадлежности тары к одному из классов («бутылка ПЭТФ» или «алюминиевая банка»). Данная проверка проводится нейронной сетью [1–3]. Если распознаваемый объект имеет слишком малый процент принадлежности к описанным классам, то он возвращается пользователю, а автомат на дисплее отображает соответствующую информацию и возвращается к шагу 1;

3) если в классе, определённом на шаге 2, нет тары, принимаемой на особых условиях, то автомат перемещает распознанную тару в отсек хранения и выдаёт пользователю соответствующую информацию, переходя к шагу 1. В обратном случае автомат переходит к шагу 4, запуская дополнительный этап иерархического распознавания, описываемый в данной статье;

4) происходит плавное вращение тары в отсеке распознавания для создания комплексного изображения боковой поверхности тары путём программной склейки изображений узких участков поверхности, находящихся перед видеокамерой (для минимизации искривлений на итоговом изображении);

5) с помощью каскадов Хаара на изображении, полученном на шаге 4, выделяются области, соответствующие искомым признакам (прямоугольный белый объекта с полосами контрастного цвета внутри). Пример такого грубого поиска продемонстрирован на рис. 4;

6) отмеченные области (их может быть несколько на одном образце тары из-за особенностей графического дизайна), полученные на шаге 5, передаются системе для распознавания. В случае если штрихкод распознан как повреждённый, происходит попытка его восстановления и сопоставления с базой для принятия решения о выдаче вознаграждения. В случае успешного считывания правильного штрихового

Подобная модернизация позволит повысить культуру утилизации бытовых отходов у рядового городского жителя за счёт более привлекательных акций по сравнению с обычным вознаграждением за утилизацию пустого контейнера.

Библиографический список

1. Kokoulin A.N., Tur A.I., Yuzhakov A.A. Convolutional Neural Networks Application in Plastic Waste Recognition and Sorting // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 ElConRus). – Saint-Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». – P. 1118–1122.

2. Кокоулин А.Н., Тур А.И., Даденков С.А. Оптическая система сортировки пустых контейнеров // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2018. – № 7. – С. 3–7. DOI: 10.18127/j19998554-201807-01

3. Вопросы разработки и настройки оптической подсистемы распознавания и сортировки пустых контейнеров в системе раздельного приема бытовых отходов / А.Н. Кокоулин, А.И. Тур, А.И. Князев, А.А. Южаков // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – № 9. – Т. 16. – С. 45–50. DOI: 10.18127/j20700814-201809-07

4. Огрель Л.Д. Оценка накопления, сбора и переработки отходов ПЭТФ в России // Экологический вестник России. – 2012. – № 4. – С. 26–31.

5. Lasoff M.A. An Rv By Any Other Name // Waste Age. – 2000. – Vol. 31. – № 7. – P. 34.

6. Труфанова Е.В., Кузнецова Н.А., Макеев П.В. Штрихкод. История создания, его разновидности и назначение // Новая наука: теоретический и практический взгляд. – 2016. – № 8. – С. 186–188.

7. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 57, № 2. – P. 137–154.

8. Иванько М.А. Клепикова А.В. Системы искусственного зрения // Вестник МГУП им. Ивана Фёдорова. – 2015. – № 5.

9. Южаков А.А., Тур А.И. Выбор алгоритмов для реализации системы машинного зрения // Управление большими системами. УБС-2017: материалы XIV Всерос. школы-конф. молодых ученых; 4–8 сентября 2017 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – С. 465–473.

10. Iandola F. Forrest, Han Song, Moskewisz W. Mattewet. SqueezeNet: MobileNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0,5 Mb model size // ICLR'17 conference proceedings. – 2017. – P. 207–212.

11. LeCun Y., Bottou L., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86(11). – P. 2278–2324.

12. Kokoulin A., May I., Kokoulina A. Image Processing Methods in Analysis of Component Composition and Distribution of Dust Emissions for Environmental Quality Management // Proceedings of 10th International Conference on Large-Scale Scientific Computations (LSSC); Bulgarian Acad Sci, Sozopol, BULGARIA. – 2015. – Jun 08–12. – Vol. 9374. – P. 352–359.

13. Kokoulin A., Methods for Large Image Distributed Processing and Storage // IEEE EUROCON Conference; Zagreb, CROATIA. – 2013. – Jul 01–04. – P. 1600–1603.

14. Yuzhakov A.A., Kokoulin A.N., Tur A.I. Application of Fuzzy Search Algorithms and Neural Networks in Fingerprint Document Analysis // 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM); Saint Petersburg, Russia, May 24–26. – 2017. – P. 455–457.

15. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, E. Brevdo, Z. Chen, C. Citro, G. S. Corrado, A. Davis, J. Dean, M. Devin [et al.] // Software available from tensorflow.org. – 2015. – Vol. 1. – № 2.

16. Novel dataset for fine-grained image categorization / A. Khosla, N. Jayadevaprakash, B. Yao, L. Fei-Fei // First Workshop on Fine-Grained Visual Categorization, IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – Colorado Springs, CO, 2011.

17. Хижняков Ю.Н. Современные проблемы теории управления: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 237 с.

18. Слива М.В. Использование миникомпьютера Raspberry PI для преподавания основ робототехники // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. / Нижневарт. гос. ун-т. – Нижневарт. 2014. – С. 326–328.

19. Линева Ф.А., Киселева С.Д. Интернет вещей на основе Raspberry PI // Молодежный науч.-техн. вестник. – 2015. – № 5. – С. 22.

20. Коваленко Р.О. Анализ скорости работы Java на Raspberry PI // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й Всерос. молодеж. науч. школы-сем. – 2016. – С. 104–105.

References

1. Kokoulin A.N., Tur A.I., Yuzhakov A.A. Convolutional Neural Networks Application in Plastic Waste Recognition and Sorting. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 ElConRus)*. Saint-Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", pp. 1118-1122.

2. Kokoulin A.N., Tur A.I., Dadenkov S.A. Opticheskaya sistema sortirovki pustyykh konteynerov [Optical sorting system for empty containers]. *Neirokomp'yutery: razrabotka, primeneniye*, 2018, no. 7, pp. 3-7. DOI: 10.18127/j19998554-201807-01

3. Kokoulin A.N., Tur A.I., Kniazev A.I., Iuzhakov A.A. Voprosy razrabotki i nastroyki opticheskoi podsistemy raspoznavaniia i sortirovki pustyykh konteynerov v sisteme razdel'nogo priema bytovyykh otkhodov [Issues of development and configuration of the optical subsystem for recognition and sorting of empty containers in the system of separate collection of household waste]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravliaiushchie sistemy*, 2018, no. 9, vol. 16, pp. 45-50. DOI: 10.18127/j20700814-201809-07

4. Ogrel' L.D. Otsenka nakopleniia, sbora i pererabotki otkhodov PETF v Rossii [Assessment of the accumulation, collection and recycling of PET waste in Russia]. *Ekologicheskii vestnik Rossii*, 2012, no. 4, pp. 26-31.

5. Lasoff M.A. An Rv By Any Other Name. *Waste Age*, 2000, vol. 31, no. 7, 34 p.

6. Trufanova E.V., Kuznetsova N.A., Makeev P.V. Shtrikhkod. Istoriia sozdaniia, ego raznovidnosti i naznacheniye [Barcode. History of creation, its varieties and purpose]. *Novaia nauka: teoreticheskii i prakticheskii vzgliad*, 2016, no. 8, pp. 186-188.

7. Viola P., Jones M.J. Robust real-time face detection. *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 137-154.

8. Ivan'ko M.A., Klepikova A.V. Sistemy iskusstvennogo zreniia [Artificial vision systems]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta pechati imeni Ivana Fedorova*, 2015, no. 5.

9. Iuzhakov A.A., Tur A.I. Vybór algoritmov dlia realizatsii sistemy mashinnogo zreniia [Selection of algorithms for the implementation of machine vision]. *Upravlenie bol'shimi sistemami (UBS-2017)*. *Materialy XIV Vserossiiskoi shkoly-konferentsii molodykh uchenykh*, 4-8 September 2017. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2017, pp. 465-473.

10. Iandola F. Forrest, Han Song, Moskewisz W. Mattewet. SqueezeNet: MobileNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0,5 Mb model size. *ICLR'17 conference proceedings*, 2017, pp. 207-212.

11. LeCun Y., Bottou L., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86(11), pp. 2278-2324.

12. Kokoulin A., May I., Kokoulina A. Image Processing Methods in Analysis of Component Composition and Distribution of Dust Emissions for Environmental Quality Management. *Proceedings of 10th International Conference on Large-Scale Scientific Computations (LSSC) Bulgarian Acad Sci, Sozopol, BULGARIA*, 2015, Jun 08-12, vol. 9374, pp. 352-359.

13. Kokoulin A., Methods for Large Image Distributed Processing and Storage. *IEEE EUROCON Conference; Zagreb, CROATIA*, 2013, Jul 01-04, pp. 1600-1603.

14. Yuzhakov A.A., Kokoulin A.N., Tur A.I. Application of Fuzzy Search Algorithms and Neural Networks in Fingerprint Document Analysis. *20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM); Saint Petersburg, Russia*, May 24-26 2017, pp. 455-457.

15. Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Corrado G.S., Davis A., Dean J., Devin M. et al. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. *Software available from tensorflow. Org*, 2015, vol. 1, no. 2.

16. Khosla A., Jayadevaprakash N., Yao B., Fei-Fei L. Novel dataset for fine-grained image categorization. *First Workshop on Fine-Grained Visual Categorization, IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*. Colorado Springs, CO, 2011.

17. Khizhniakov Iu.N. Sovremennye problemy teorii upravleniia [Современные проблемы теории управления]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015, 237 p.

18. Sliva M.V. Ispol'zovanie minikomp'iutera Raspberry PI dlia prepodavaniia osnov robototekhniki [Using the Raspberry PI minicomputer to teach the basics of robotics]. *Kul'tura, nauka, obrazovanie: problemy i perspektivy. Materialy III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovskii gosudarstvennyi universitet, 2014, pp. 326-328.

19. Linev F.A., Kiseleva S.D. Internet veshchei na osnove Raspberry PI [The Internet of Things based on Raspberry PI]. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik*, 2015, no. 5, 22 p.

20. Kovalenko R.O. Analiz skorosti raboty Java na Raspberry PI [Analysis of the speed of Java on the Raspberry PI]. *Aktual'nye problemy fizicheskoi i funktsional'noi elektroniki. Materialy 19-i Vserossiiskoi molodezhnoi nauchnoi shkoly-sememinara*, 2016, pp. 104-105.

Сведения об авторах

Тур Александр Игоревич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tur.aleksandr93@mail.ru).

Кокоулин Андрей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru).

Дзыгарь Андрей Владимирович (Пермь, Россия) – коммерческий директор ООО «ФейсПасс», Пермь, e-mail: da@facepass.ru.

About the authors

Tur Alexander Igorevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department Automatic and Telemechanic of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: tur.aleksandr93@mail.ru).

Kokoulin Andrey Nikolaevich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department Automatic and Telemechanic Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru).

Dzygar Andrey Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is a Commercial Director of LLC "FeysPass", Perm, e-mail: da@facepass.ru.

Получено 17.01.2019

УДК 621.313

С.А. Ганджа¹, Д.С. Аминов¹, Б.И. Косимов¹, Р.Р. Ниматов²¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия²Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Интенсивное развитие систем с постоянными магнитами требует совершенствования методов их расчета. В настоящее время создать электромеханические устройства с высокими массоэнергетическими показателями невозможно без точных методов расчета полей и оптимизационных расчетов. При этом возникает следующее техническое противоречие. Точные электромагнитные расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и применения сложных программ, таких как Ansys, Cosmos, а методы оптимизации нуждаются в большом количестве циклов вычислений при выборе наилучших параметров. Включить тяжеловесные программы в оптимизационные циклы, несмотря на их точность, не представляется возможным из-за неприемлемого времени вычисления. Разрешить это противоречие можно только в одном случае: необходимо создать простую, но точную модель расчета магнитной системы, которую можно было бы использовать для оптимизации. В статье предлагается решение данной проблемы, а именно методика, основанная на методе конечных элементов. Но для реализации этого метода используется заранее выбранное ограниченное количество элементов, обеспечивающих требуемую точность. **Это новый подход в решении подобных задач.** Таким образом, получен простой с точки зрения реализации, но приемлемый по точности расчета основных электромагнитных параметров метод. Он прошел апробацию для моделей оптимизации с большим числом циклов при проектировании систем с постоянными магнитами и показал очень хорошие результаты по времени счета и точности. Метод применялся при проектировании магнитных систем генераторов ветроэнергетических установок, вентильных двигателей для запорной аппаратуры, генераторов для дизель-электрических установок источников бесперебойного питания. Этот подход можно рекомендовать для решения других подобных задач: тепловых, вентиляционных, гидравлических, динамики напряжений.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитный поток, индукция, метод конечных элементов, векторный магнитный потенциал, оптимальное проектирование.

S.A. Gandzha¹, D.S. Aminov¹, B.I. Kosimov¹, R.R. Nimatov²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHODS OF CALCULATION MAGNETIC SYSTEMS WITH PERMANENT MAGNETS ON THE BASIS OF THE FINITE ELEMENT METHOD

Intensive development of systems with permanent magnets requires improvement of their calculation methods. At present, it is impossible to create Electromechanical devices with high mass-energy indicators without accurate methods of field calculation and optimization calculations. Thus there is the following technical contradiction. Accurate electromagnetic calculations require significant computational resources and the use of complex programs such as Ansys, Cosmos, and optimization methods require a large number of calculation cycles when choosing the best parameters. It is not possible to include heavy-weight programs in optimization cycles, despite their accuracy, because of the unacceptable calculation time. This contradiction can be solved in only one case: it is necessary to create a simple but accurate model for the calculation of the magnetic system, which could be used for optimization. The article offers a solution to this problem. A technique based on the finite element method is proposed, but a pre-selected limited number of elements providing the required accuracy is used to implement this method. **This is a new approach to solving such problems.** Thus, the method is simple in terms of implementation, but acceptable in terms of accuracy of calculation of the basic electromagnetic parameters. It has been tested for optimization models with a large number of cycles in the design of permanent magnet systems and has shown very good results in counting time and accuracy. The method used in the design of magnetic systems of generators of wind power installations, gate motors, shutoff devices, generators for diesel-electric installations of uninterruptible power supplies. This approach can be recommended for solving other similar problems: thermal, ventilation, hydraulic, dynamics of stress.

Keywords: magnetic field, magnetic flux, induction, finite element method, vector magnetic potential, optimal design.

Электроприводы на базе вентильных электрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами постоянно совершенствуются. Эта тенденция объясняется развитием оборонных систем, дальнейшим освоением космоса, появлением интеллектуальных приводов в гражданской сфере. Создание новых, доступных по цене магнитных материалов, развитие силовой электроники ускоряют этот процесс. При этом требуются постоянное увеличение удельных энергетических показателей, повышение надежности, снижение себестоимости разрабатываемых изделий. Эти задачи невозможно решить без выбора оптимальной геометрии магнитной системы вентильной машины по заранее определенному экспертом показателю качества. В зависимости от назначения привода это может быть минимальный вес, минимальный объем, максимальный коэффициент полезного действия, минимальная масса

активных материалов (меди и постоянных магнитов), максимальное быстроедействие. Следует отметить, что все современные методы оптимального проектирования основаны на большом количестве итерационных циклов [1]. В зависимости от выбранного метода оптимизации и сложности математической модели, описывающей электромагнитные процессы в электрической машине, число циклов перебора независимых переменных может достигать десятков и сотен тысяч. Даже мощные вычислительные комплексы очень часто не могут в разумный временной интервал рассчитать оптимальную геометрию при таком числе анализируемых вариантов. По этой причине невозможно использовать точные, но тяжеловесные программы электромагнитного анализа, такие как Ansys, Cosmos, Nastran и другие. Кафедра теоретических основ электротехники ЮУрГУ с этой проблемой столкнулась много лет назад при разработке электроприводов для специальной техники. Все эти годы делались неоднократные попытки разработать простую, но приемлемую по точности методику расчета магнитных систем с высококоэрцитивными магнитами. Применялись методы: по кривым возврата, граничной коллокации, планирования эксперимента и другие [2–6]. Все эти попытки приводили к удовлетворительному решению конкретных узких задач, но при включении этих методов в оптимизационный цикл получался, как правило, отрицательный результат.

Из-за погрешности расчета блок-оптимизатор часто выбирал нереальные для практики размеры. Например, из-за погрешности расчета потока рассеяния с боковой грани магнита программа оптимизации часто выбирала высоту магнита из материала неодим-железо-бор более 300 мм. Такие магниты на практике не изготавливают из-за невозможности их качественного промагничивания. Следует отметить, что точность расчета параметров магнитной системы очень важна, так как эти параметры в основном определяют энергетику системы (потери, тепловое состояние, КПД).

Таким образом, задача разработки простой, но достаточно точной инженерной методики расчета систем с постоянными магнитами до сих пор остается острой и актуальной. Анализ литературы [2, 3] и практика оптимизации магнитоэлектрических систем на кафедре теоретических основ электротехники позволяют утверждать, что решение данной задачи представляет научную новизну. В данной статье предпринята попытка решения этой проблемы.

Постановка задачи. Магнитную систему практически всех электротехнических изделий можно привести в виду, представленному на рис. 1.

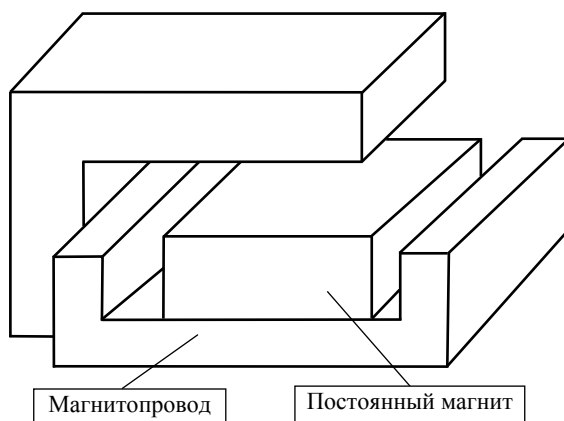


Рис. 1. Расчетная модель магнитной системы

Данная модель учитывает все особенности магнитного состояния системы: потоки в нейтральном сечении, потоки рассеяния, рабочий поток. Даже электрическую машину со сложной геометрией зубцовой зоны можно в первом приближении привести к указанной расчетной схеме. Это можно объяснить тем, что основное сопротивление магнитному потоку для ненасыщенных и слабо насыщенных магнитных систем представляет воздушный зазор.

Если идти по пути дальнейшего упрощения, то можно перейти от объема к плоской задаче, которая представлена на рис. 2.

На рис. 2 показаны следующие размеры: hm – высота магнита; bm – ширина магнита; hj – толщина магнитопровода; δ – расстояние между торцевой гранью магнита и магнитопроводом; δ – воздушный зазор.

Как было отмечено выше, наиболее надежным и проверенным на практике методом расчета магнитных систем является метод конечных элементов [4–10]. Но применение данного метода содержит следующее противоречие: использование большого количества элементов повышает точность расчета, но делает применение этого метода громоздким и неприемлемым для формирования системы уравнений вручную при создании инженерной методики. С другой стороны, малое количество элементов недопустимо огрубляют задачу и не позволяют получить требуемую для практики точность.

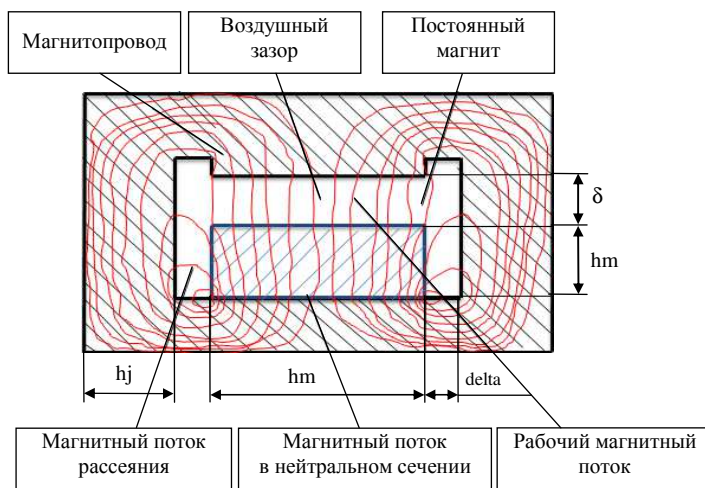


Рис. 2. Плоский вариант расчетной задачи

Для решения поставленной задачи было принято простое, но достаточно эффективное решение. Путем нескольких тестовых вычислений для достаточно большого количества разнообразных магнитных систем было выбрано количество элементов, обеспечивающих требуемую точность расчета и позволяющих сформировать систему уравнений вручную. Эти уравнения были первоначально заложены и проверены в программе Mathcad, а затем переведены на программный язык высокого уровня Delphi для проведения оптимизационных расчетов различных магнитных систем. Для указанных программ были сформированы инженерные методики расчета для учебного процесса и научных исследований.

Использование метода конечных элементов для построения математической модели. Метод конечных элементов для расчета магнитных полей основан на аппроксимации векторного магнитного потенциала дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами (КЭ). Плоскопараллельные краевые задачи используют декартову систему координат. Внутри каждого элемента векторный магнитный потенциал можно представить в виде интерполяционного полинома первой степени (рис. 3).

Примем нумерацию узлов в элементе i, j, k против часовой стрелки. Узловые значения потенциала обозначим через A_i, A_j, A_k , а координаты узлов соответственно $(X_i, Y_i), (X_j, Y_j), (X_k, Y_k)$. Подстановка в интерполяционный полином приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned} A_i &= \alpha_1 + \alpha_2 X_i + \alpha_3 Y_i, \\ A_j &= \alpha_1 + \alpha_2 X_j + \alpha_3 Y_j, \\ A_k &= \alpha_1 + \alpha_2 X_k + \alpha_3 Y_k. \end{aligned}$$

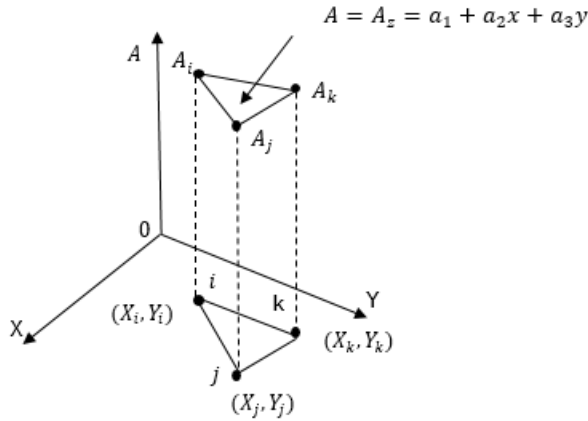


Рис. 3. Представление векторного магнитного потенциала для одного элемента

В результате решения системы уравнений можно определить коэффициенты:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{2S_a} [(X_j Y_k - X_k Y_j) A_i + (X_k Y_i - X_i Y_k) A_j + (X_i Y_j - X_j Y_i) A_k], \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2S_a} [(Y_j - Y_k) A_i + (Y_k - Y_i) A_j + (Y_i - Y_j) A_k], \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2S_a} [(X_k - X_j) A_i + (X_i - X_k) A_j + (X_j - X_i) A_k]. \end{aligned}$$

Площадь элемента S_a можно определить из матричного соотношения:

$$S_a = 0,5 \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}.$$

Подставляя значения коэффициентов в интерполяционный полином, можно записать выражение для функции векторного магнитного потенциала через три функции формы, по одной для каждого узла:

$$A = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k.$$

Для каждого узла функция формы выглядит следующим образом:

$$N_i = \frac{1}{2S_a} (a_i + b_i x + c_i y),$$

где $a_i = X_j Y_k - X_k Y_j$, $b_i = Y_j - Y_k$, $c_i = X_k - X_j$;

$$N_j = \frac{1}{2S_a} (a_j + b_j x + c_j y),$$

где $a_j = X_k Y_i - X_i Y_k$, $b_j = Y_k - Y_i$, $c_j = X_i - X_k$;

$$N_k = \frac{1}{2S_a} (a_k + b_k x + c_k y),$$

где $a_k = X_i Y_j - X_j Y_i$, $b_k = Y_i - Y_j$, $c_k = X_j - X_i$.

Решение краевой задачи теории поля методом конечных элементов производится на основе вариационного исчисления. С вариационной точки зрения решение дифференциального уравнения в частных производных с заданными граничными условиями эквивалентно нахождению минимума энергетического функционала:

$$F = \int_S \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS - \int_S A J dS,$$

где $B_x = \frac{\partial A}{\partial y}$, $B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}$ – составляющие вектора магнитной индукции поля, распределенного в области S по осям X и Y .

Записав условие минимума функционала, являющегося функцией значений A_i, A_j, A_k на каждом конечном элементе, получим систему алгебраических уравнений для определения значений векторного потенциала в узлах треугольников, которыми покрывается расчетная область:

$$\frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_i} = \frac{1}{4\mu S_a} [(c_i^2 + b_i^2)A_i + (c_i c_j + b_i b_j)A_j + (c_i c_k + b_i b_k)A_k] - j \frac{S_a}{2} = 0,$$

$$\frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_j} = \frac{1}{4\mu S_a} [(c_i c_j + b_i b_j)A_i + (c_j^2 + b_j^2)A_j + (c_j c_k + b_j b_k)A_k] - j \frac{S_a}{2} = 0,$$

$$\frac{\partial F^{(\alpha)}}{\partial A_k} = \frac{1}{4\mu S_a} [(c_i c_k + b_i b_k)A_i + (c_j c_k + b_j b_k)A_j + (c_k^2 + b_k^2)A_k] - j \frac{S_a}{2} = 0.$$

На основе полученных уравнений для каждого конечного элемента (треугольника) образуется система алгебраических уравнений, решение которой дает значения векторного магнитного потенциала A в вершинах треугольников (рис. 4).

На первом этапе построения модели были определены координаты узлов через варьируемые параметры геометрии системы. Таким образом, при изменении размеров магнитной системы изменялись только размеры элементов, количество элементов и узлов при этом оставалось

заданным (60 элементов, 42 узла). Далее были заданы размеры матрицы жесткости (20,20) и линейного вектора свободных членов (20), которые на начальном этапе были обнулены. Затем был составлен алгоритм для определения элементов локальной матрицы жесткости. По этому алгоритму были определены элементы всех локальных матриц жесткости. Элементы глобальной матрицы жесткости были получены путем сложения значений локальных элементов. Намагниченность постоянного магнита была учтена плотностью тока элементов 15, 25 и 35, которая рассчитывалась через коэрцитивную силу магнитного материала и высоту магнита. В общей сложности при формировании локальных матриц и глобальной матрицы необходимо было сформировать вручную 483 уравнения. Столь объемная задача оказалась не очень сложной, поскольку линейные алгебраические уравнения достаточно просты и однотипны. Для решения системы уравнений был использован метод Гаусса, который в виде стандартной процедуры заложен в Mathcad и Delphi.

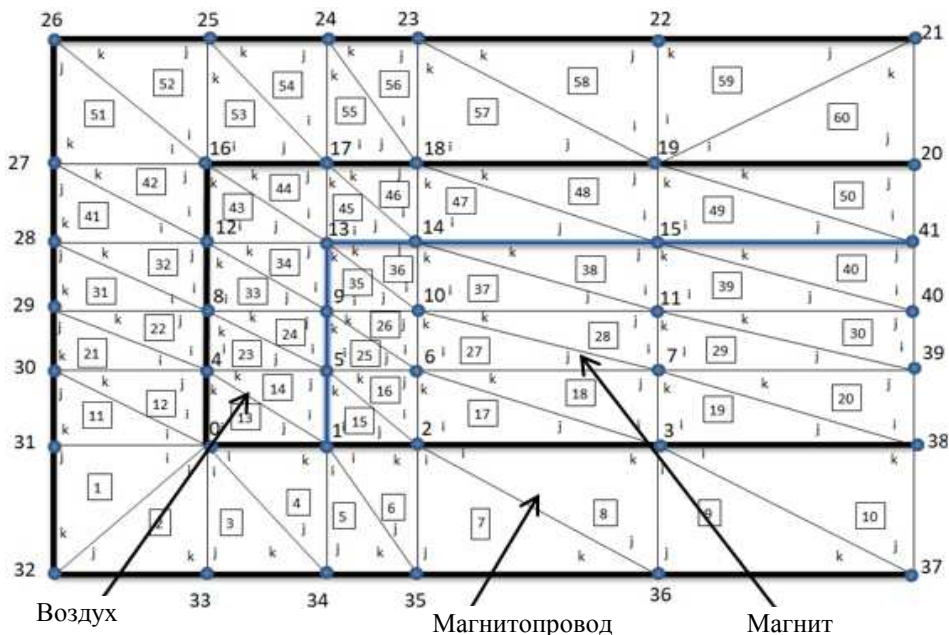


Рис. 4. Разбиение магнитной системы на конечные элементы

Фрагмент реализации инженерной методики в программе Mathcad представлен ниже. Показаны вычисления для наиболее характерного для 15-го элемента, так как он содержит материал постоянного магнита.

Элемент 15

Магнитная проницаемость элемента:

$$\mu_i := \mu_{tag} := 1,236 \times 10^{-6}.$$

Нумерация узлов 15-го элемента:

$$\mu_{yi} := 1, \mu_{yj} := 2, \mu_{yk} := 5.$$

Обнуление локальной матрицы:

$$aa := 0.$$

Координаты узлов элемента:

$$X_i := x_{\mu_{yi}} Y_i := y_{\mu_{yi}},$$

$$X_j := x_{\mu_{yj}} Y_j := y_{\mu_{yj}},$$

$$X_k := x_{\mu_{yk}} Y_k := y_{\mu_{yk}},$$

Площадь элемента

$$S := 0.5 \begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix},$$

Коэффициенты для вычисления локальной матрицы жесткости

$$C_i := X_k - X_j B_i := Y_j - Y_k,$$

$$C_j := X_i - X_k B_j := Y_k - Y_i,$$

$$C_k := X_j - X_i B_k := Y_i - Y_j.$$

Определение элементов локальной матрицы жесткости

$$aa_{\mu_{yi}. \mu_{yi}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_i^2 + B_i^2),$$

$$aa_{\mu_{yj}. \mu_{yi}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_i \cdot C_j + B_i \cdot B_j),$$

$$aa_{\mu_{yi}. \mu_{yk}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_i \cdot C_k + B_i \cdot B_k),$$

$$aa_{\mu_{yj}. \mu_{yi}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_i \cdot C_j + B_i \cdot B_j),$$

$$aa_{\mu_{yj}. \mu_{yj}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_j^2 + B_j^2),$$

$$aa_{\mu_{yj}. \mu_{yk}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_j \cdot C_k + B_j \cdot B_k),$$

$$aa_{\mu_{yk}. \mu_{yi}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_i \cdot C_k + B_i \cdot B_k),$$

$$aa_{\mu_{yk}. \mu_{yj}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_j \cdot C_k + B_i \cdot B_k),$$

$$aa_{\mu_{yk}. \mu_{yk}} := \frac{1}{4\mu_i \cdot S} \cdot (C_k^2 + B_k^2).$$

Формирование вектора свободных членов

$$b_{nyi} := \frac{Hc \cdot hm}{9} b_{nyj} := \frac{Hc \cdot hm}{9} b_{nyk} := \frac{Hc \cdot hm}{9}.$$

Сложение элементов локальной матрицы жесткости с элементами глобальной матрицы жесткости:

$$a := a + aa.$$

После формирования глобальной матрицы жесткости и глобального вектора свободных членов система уравнений составлена и может быть решена относительно магнитных потенциалов в узлах элементов:

$$A := a^{-1} \cdot b.$$

Через значения магнитных потенциалов в узлах элементов можно определить все характеристики магнитной системы.

Средняя индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\text{delta}} := \frac{A_{17}}{0,5bm}.$$

Средняя индукция на поверхности магнита:

$$B_{\text{mag}} := \frac{A_{13}}{0,5bm}.$$

Средняя индукция в нейтральном сечении магнита:

$$B_{\text{nmag}} := \frac{A_1}{0,5bm}.$$

Магнитный поток:

$$F_{\text{mag}} := A_{13}.$$

Для проверки точности расчета разработанной инженерной методики она сравнивалась с решением задач копий в программе AnsysElectronicsDesktop, которая осуществляет автоматическую разбивку области расчета на несколько тысяч элементов.

В качестве одного из вариантов тестирования была выбрана магнитная система со следующими параметрами:

– воздушный зазор, м	0,01;
– толщина магнита, м	0,01;
– ширина магнита, м	0,04;
– толщина магнитопровода, м	0,02;
– расстояние между боковой гранью магнита и магнитопроводом (для потоков рассеяния), м	0,005;
– остаточная индукция магнитного материала, Тл	1,1;
– коэрцитивная сила магнитного материала, А/м	890 000.

На рис. 5. представлены результаты сравнительного анализа расчета основных параметров в программе Mathcad и в программе AnsysElectronicsDesktop.

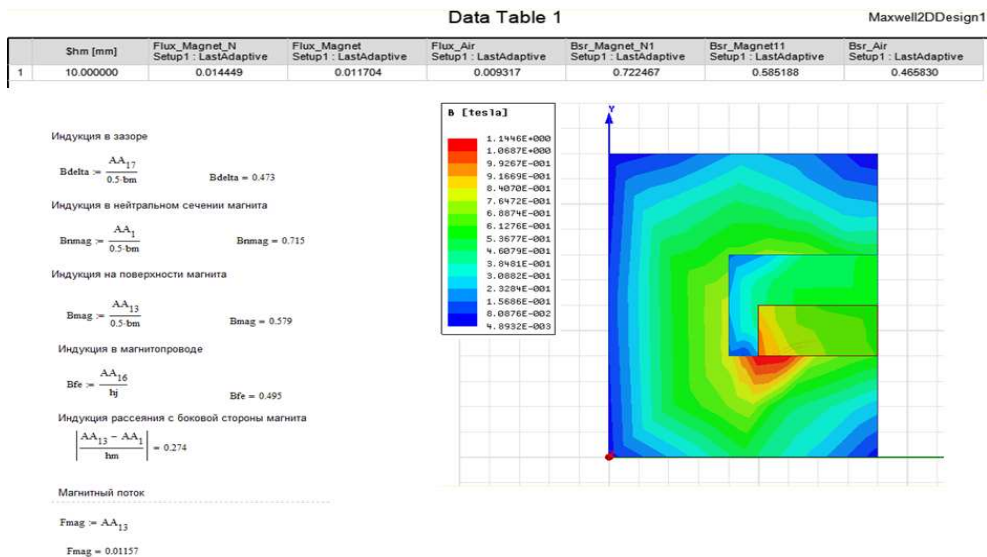


Рис. 5. Результаты решения задачи копии в программе AnsysElectronicsDesktop

Погрешность по определению средней индукции в воздушном зазоре составила 1,5 %, что является очень хорошим результатом для инженерных расчетов. Следует отметить, что время решения всех тестовых задач составило доли секунды в отличие от работы программы AnsysElectronicsDesktop, которая занимала около 2 минут.

Анализ результатов. Данная расчетная модель была использована для расчета магнитных систем в программах оптимизации вентиляционных машин комбинированного возбуждения, в расчетах вентиляционных магнитоэлектрических машин радиальных и тангенциальных систем возбуждения, при расчете магнитоэлектрических генераторов для ветроэнергетических установок [11–22]. Для блока-оптимизатора применялся метод покоординатного спуска в сочетании с методом Фибоначчи. Известно, что метод покоординатного спуска содержит очень большое число циклов, которое резко возрастает при увеличении числа варьируемых переменных [1]. При решении названных оптимизационных задач использовалось до 5 циклично изменяемых параметров. Время оптимизационных расчетов при этом не превысило 30–40 с.

Предлагаемая методика использования достаточно сложного метода конечных элементов, но при небольшом, заранее определенном с точки зрения требуемой точности, фиксированном числе узлов и самих элементов, представляет собой новый подход к решению задач данного типа. Его можно рекомендовать для решения других подобных задач, для которых используется метод конечных элементов.

Выводы. В основу разработанной инженерной методики расчета магнитной системы положен проверенный на практике метод конечных элементов. Существенное упрощение модели позволило сократить затраты на решение задачи. Модель можно использовать в качестве основы для проведения оптимизационных расчетов с большим количеством циклов по перебору независимых элементов. При этом точность определения основных параметров магнитной системы получилась довольно высокой и составляет около 1,5 %. Методика реализована и апробирована в программах Mathcad и Delphi. Данная расчетная модель успешно применялась для оптимизации широкого круга вентильных электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением.

Таким образом, поставленная задача разработки простой, но точной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами, которую можно использовать для оптимизации с большим циклом итераций, достигнута. *Этот новый подход может быть использован для решения подобных задач из других сфер научной деятельности: гидродинамики, аэродинамики, теплодинамики, динамики напряжений.*

Работа выполнялась в Южно-Уральском государственном университете при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-00327). Авторы благодарят администрацию университета, предоставившую возможность реализации данного проекта.

Библиографический список

1. Геминтерн В.И., Каган Б.М. Методы оптимального проектирования. – М.: Энергия, 1980.
2. Gandzha S., Kiessh I., Aminov D. Development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets // International Conference on Industrial Engineering; 15–18 May 2018, Moscow. – Moscow, 2018.
3. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1964. – 480 с.

4. Вольдек А.И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // *Электричество*. – 1966. – № 7. – С. 46–52.

5. Daryl L. Logan. A first course in the finite element method. Cengage Learning. – 2011.

6. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method (Third ed.). – McGraw-Hill, 2006.

7. Hinton Ernest, Irons Bruce. Least squares smoothing of experimental data using finite elements // *Strain*. – July 19684. – P. 24–27. DOI: 10.1111/j.1475-1305.1968.tb01368.x

8. Gard Paulsen, Håkon With Andersen, John Petter Collett, Iver Tangen Stensrud. Building Trust. The history of DNV 1864–2014. Lysaker, Norway: Dinamo Forlag A/S. – 2014. – P. 121, 436.

9. Strang Gilbert, Fix George. An Analysis of The Finite Element Method. – Prentice Hall, 1973.

10. Bathe K.J. Finite Element Procedures. – Cambridge, MA: Klaus-Jürgen Bathe, 2006.

11. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (Sixth ed.). – Butterworth-Heinemann, 2005.

12. Gandzha S.A. Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction // *Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH*; 20–21 April 2006. – Moscow, 2006. – P. 358–360.

13. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. Starter-generator for autonomous source of energy supply // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика*. – 2005. – Вып. 6, № 9. – P. 84–86.

14. Gandzha S.A. The application of synchronous induction generator for windmill // *ELMASH-2009. Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы: тр. симп.* – М., 2009. – Т. 1. – С. 168–170.

15. Gandzha S.A., Halstead R.L. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills // *Design World (engineering solution for product manufactures)*. – 2012. – № 1. – URL: www.designworldonline.com

16. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills // *Procedia Engineering*. – December 2015. – 129. – P. 191–194.

17. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable speed power // *Procedia Engineering*. – December 2015. – 129. – P. 731–735.

18. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase // *Procedia Engineering*. – December 2015. – 129. – P. 408–414.

19. Application of digital twins technology for the analysis of brushless electric machines with axial magnetic flux / S.A. Gandzha, D.S. Aminov, I.E. Kiessh, B.I. Kosimov // *Digital industry: state and prospects of development 2018: International scientific conference*. – 2018.

20. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms // *International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*. – 2018. – P. 282–287.

21. Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Методика инженерного расчета синхронных генераторов с аксиальным магнитным потоком // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика*. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 85–87.

22. Ганджа С.А., Мартьянов А.С. Определение оптимальных габаритных размеров для вентильных машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП) // *Вестник Южно-Урал. гос. ун-та. Сер. Энергетика*. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 88–90.

References

1. Gemintern V.I., Kagan B.M. *Metody optimal'nogo proektirovaniia* [Methods of optimal design]. Moscow: Energiia, 1980.

2. Gandzha S., Kiessh I., Aminov D. Development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. *International Conference on Industrial Engineering*, 15-18 May 2018. Moscow, 2018.

3. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. *Elektricheskie mashiny s postoiannymi magnitami* [Electric machines with permanent magnets]. Moscow: Energiia, 1964. 480 p.

4. Vol'dek A.I. *Issledovanie magnitnogo polia v vozdushnom zazore iavnopoliusnykh sinkhronnykh mashin metodom garmonicheskikh provodimostei* [Study of the magnetic field in the air gap of polar-pole

synchronous machines by the method of harmonic conductivities]. *Elektrichestvo*, 1966, no. 7, pp. 46-52.

5. Daryl L. Logan. A first course in the finite element method. Cengage Learning, 2011.

6. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method (Third ed.). McGraw-Hill, 2006.

7. Hinton Ernest, Irons Bruce. Least squares smoothing of experimental data using finite elements. *Strain*. July 1968, pp. 24-27. DOI: 10.1111/j.1475-1305.1968.tb01368.x

8. Gard Paulsen, Håkon With Andersen, John Petter Collett, Iver Tangen Stensrud. Building Trust. The history of DNV 1864-2014. Lysaker, Norway: Dinamo Forlag A/S, 2014, pp. 121, 436.

9. *Strang Gilbert, Fix George*. An Analysis of The Finite Element Method. Prentice Hall, 1973.

10. Bathe, K.J. Finite Element Procedures. Cambridge, MA: Klaus-Jürgen Bathe, 2006.

11. *Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z.* The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (Sixth ed.). Butterworth-Heinemann, 2005.

12. Gandzha S.A. Modelling of Permanent Magnet Direct Current Motor with Electromagnetic Reduction. *Collection of papers of Software Users Sixth Conference CAD_FEMGmbH*, 20-21 April 2006. Moscow, 2006, pp. 358-360.

13. Gandzha S.A., Erlisheva A.V. Starter-generator for autonomous source of energy supply. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2005, iss. 6, no. 9, pp. 84-86.

14. Gandzha S.A. The application of synchronous induction generator for windmill. *ELMASH-2009. Elektroenergetika i elektrotehnika. Problemy i perspektivy. Trudy simpoziuma*. Moscow, 2009, vol. 1, pp. 168-170.

15. Gandzha S.A., Halstead R.L. Optimal design of brushless axial gap electric machines for low power windmills. *Design World (engineering solution for product manufactures)*, 2012, no. 1, available at: www.designworldonline.com

16. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Application brushless machines with combine excitation for a small and medium power windmills. *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, pp. 191-194.

17. Gandzha S.A., Kiessh I.E. Variable speed power. *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, pp. 731-735.

18. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The Comparative Analysis of Permanent Magnet Electric Machines with Integer and Fractional Number of Slots per Pole and Phase // *Procedia Engineering*. December 2015, vol. 129, pp. 408-414.

19. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kiessh I.E., Kosimov B.I. Application of digital twins technology for the analysis of brushless electric machines with axial magnetic flux. *Digital industry: state and prospects of development 2018: International scientific conference*.

20. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms. *International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, 2018, pp. 282-287.

21. Gandzha S.A., Mart'ianov A.S. Metodika inzhenerного rascheta sinkhronnykh generatorov s aksial'nym magnitnym potokom [The technique of engineering calculation of synchronous generators with an axial magnetic flux]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 85-87.

22. Gandzha S.A., Mart'ianov A.S. Opredelenie optimal'nykh gabaritnykh razmerov dlia ventil'nykh mashin s aksial'nym magnitnym potokom (VMAP) [Determination of the optimal dimensions for barrier machines with axial magnetic flux (VMAP)]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 88-90.

Сведения об авторах

Ганджа Сергей Анатольевич (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Аминов Дилшод Саидович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

Косимов Бахтиёр Исмагуллоевич – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

Ниматов Рустам Рамазонович (Комсомольск-на-амуре, Россия) – аспирант кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-амуре государственного университета (681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27, e-mail: rustam0592@mail.ru).

About the authors

Gandzha Sergey Anatolyevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Aminov Dilshod Saidovich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

Kasimov Bakhtiyor Ismatulloevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, 76, Lenina ave., e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

Nimatov Rustam Ramazanovich (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Industrial electronics of Komsomolsk-on-Amur State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, 27, Lenina ave., e-mail: rustam0592@mail.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 621.313.33

**В.В. Шапошников¹, Р.О. Токарев¹,
А.Д. Коротаев¹, Е.А. Чабанов^{1,2}**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

²Волжский государственный университет водного транспорта
(Пермский филиал), Пермь, Россия

РАСЧЕТ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА

Использование цилиндрических линейных асинхронных двигателей в настоящее время очень распространено. Они используются в глубинных насосах плунжерного типа. Установка штанговых глубинных насосов сопряжена с значительными эксплуатационными затратами. Она оказывается экономически невыгодной при дебите менее $10 \text{ м}^3/\text{сут}$, поэтому эксплуатация таких скважин прекращается. Сегодня в России значительная часть скважин остается заброшенной из-за низкого дебита. Установки штанговых глубинных насосов также связаны с дополнительными проблемами: износ насосных и компрессорных труб и штанг, большие масса и габариты станков-качалок, которые затрудняют их транспортировку. Указанные недостатки обуславливают поиск технических решений. Одним из таких решений является применение глубинно-насосных установок плунжерного типа с приводом на основе цилиндрического линейного асинхронного двигателя. Для использования данного вида двигателя необходимо знать его тяговое усилие, расчет которого представлен в данной статье. Он осуществлен по формуле, выведенной для упрощенной расчетной модели цилиндрического линейного асинхронного двигателя в декартовой системе координат. Представленная модель получена с помощью введения некоторых допущений. В статье также представлены устройство и принцип действия цилиндрического линейного асинхронного двигателя. По полученным расчетным данным были построены зависимости тягового усилия, полезной мощности и скорости движения вторичного элемента от скольжения. Были получены характеристики при значениях толщины медного покрытия вторичного элемента 0,5, 0,75 и 1 мм и частоте питающей сети 50 Гц. Полученные результаты исследований были проанализированы, а также даны рекомендации по использованию цилиндрического линейного асинхронного двигателя с указанными начальными данными.

Ключевые слова: цилиндрический линейный асинхронный двигатель, бесштанговая глубинно-насосная установка, тяговое усилие, скольжение, полюсное деление, индуктор, вторичный элемент.

**V.V. Shaposhnikov¹, R.O. Tokarev¹,
A.D. Korotaev¹, E.A. Chabanov^{1,2}**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Volga State University of Water Transport (Perm branch),
Perm, Russian Federation

CALCULATION OF TRACTION FORCE OF A CYLINDRICAL LINEAR ASYNCHRONOUS ENGINE FOR DRIVING A PLUNGER PUMP

The use of cylindrical linear asynchronous engines is currently very popular. They are used in plunger-type submersible pumps. The installation of sucker rod pumps involves significant operating costs. It turns out to be economically unprofitable at a flow rate of less than 10 m³ / day, therefore, the operation of such wells ceases. Today in Russia, a significant portion of wells remain abandoned due to low production rates. Installation of sucker rod pumps also have additional problems: wear of pump and compressor pipes and rods, large weight and dimensions of pumping units, which impede their transportation. These drawbacks cause the search for technical solutions. One of such solutions is the use of plunger-type deep-well pumping units with a drive based on a cylindrical linear asynchronous engine. To use this type of engine, it is necessary to know its tractive effort, the calculation of which is shown in this article. It is implemented according to the formula derived for a simplified design model of a cylindrical linear asynchronous engine in Cartesian coordinate system. The presented model was obtained by introducing some assumptions. The article also presents the structure and principle of operation of a cylindrical linear asynchronous engine. According to the calculated data, the dependencies of the tractive effort, useful power and speed of movement of the secondary element from sliding were built. Characteristics were obtained at the thickness of the copper coating of the secondary element 0.5 mm, 0.75 mm and 1 mm and the frequency of the supply network 50 Hz. The obtained research results were analyzed, and recommendations were made on the use of a cylindrical linear asynchronous engine with the specified initial data.

Keywords: cylindrical linear asynchronous engine, rodless deep-pumping unit, traction force, slip, pole division, inductor, secondary element.

Цилиндрические линейные асинхронные двигатели могут быть основой электроприводов с возвратно-поступательным движением как альтернатива приводам с механическим видом преобразования движения. Электроприводы линейного типа, в которых электромагнитное усилие передается подвижному элементу непосредственно, обладают лучшими регулировочными свойствами, их надежность гораздо выше, они более экономичны при обслуживании. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели применяются при создании электроприводов многих производственных механизмов: электрических коммутационных аппаратов (автоматические выключатели высокого напряжения, отделители и разъединители в системах электроснабжения, в том числе метрополитенов); толкателей поступательного движения, используемых

в поточных линиях; плунжерных или поршневых насосных агрегатов, компрессорных установок; различных манипуляторов и т.п. Столь широкая область применения линейных электроприводов обусловлена указанными выше возможностями, поэтому поддерживается устойчивый интерес к их исследованию и разработке новых конструкций [1].

В частности, цилиндрический линейный асинхронный двигатель может успешно использоваться в нефтедобывающей промышленности для организации бесштанговой добычи нефти из глубоких скважин [2, 3, 4]. На данный момент для подобных целей пока используются малоэффективные станки-качалки, основными недостатками которых являются:

- повышенная степень изнашивания насосно-компрессорных труб и штанг, обусловленная взаимным трением их поверхностей;
- достаточно частые обрывы штанг и потому малый межремонтный ресурс (300–350 сут.);
- низкие регулировочные свойства штанговых насосных агрегатов и связанная с этим необходимость использования нескольких типоразмеров станков-качалок в силу их ограниченного количества;
- большие массогабаритные параметры станков-качалок и штанг, затрудняющие как их транспортировку, так и монтаж в месте установки.

Приведенные выше недостатки обуславливают проведение дополнительных исследований с целью поиска различных технических решений, которые бы позволили создавать бесштанговые глубинно-насосные установки. Многократные исследования позволили обосновать применение глубинных насосов плунжерного типа с приводом на основе цилиндрического линейного асинхронного двигателя вместо ставших классическими станков-качалок и штанг [5, 6, 7]. В этом случае исключается возможность использования штанги и качалки, таким образом предельно упрощается механическая часть. К таким электрическим двигателям питание подается на глубину 1,5–3,0 км с помощью кабеля, как это обычно делается в электробурах и центробежных погружных насосах [8].

На рис. 1 представлена типовая конструкция цилиндрического линейного двигателя. Индуктор двигателя 1 имеет вид полой трубы, внутри которой располагаются перемежающиеся между собой плоские дискообразные катушки 2 (обмотки индуктора) и металлические шайбы 3, набранные из листов электротехнической стали и являющиеся

частью магнитопровода. Катушки электрического двигателя специальным образом соединяются группами, образуя при этом обмотки отдельных фаз двигателя. Внутри индуктора располагается вторичный элемент 4, который также имеет трубчатую форму, выполненную из ферромагнитного материала.

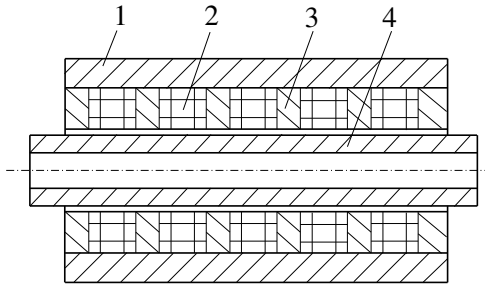


Рис. 1. Цилиндрический (коаксиальный) линейный двигатель: 1 – индуктор двигателя; 2 – обмотки индуктора; 3 – металлические шайбы; 4 – вторичный элемент

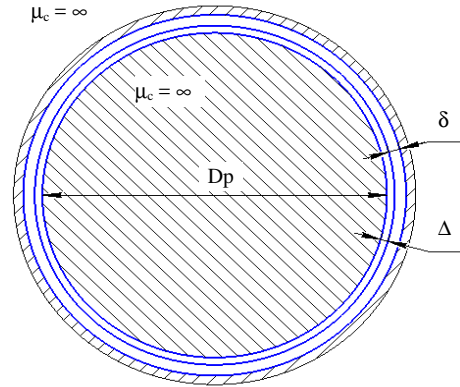


Рис. 2. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель в цилиндрической системе координат

При подключении электрического двигателя к сети протекающий по обмоткам индуктора ток создает вдоль его внутренней поверхности бегущее магнитное поле. Это поле в силу малого воздушного зазора индуктирует в теле вторичного элемента токи, протекающие по его окружности. Взаимодействие токов вторичного элемента с магнитным полем индуктора двигателя создает на этом элементе электродинамическую силу, действующую вдоль трубы (вторичного элемента). Эта сила при закрепленном индукторе приводит вторичный элемент в движение в соответствующем направлении [9, 10].

Расчет такого двигателя с помощью основных уравнений электромагнитного поля целесообразно производить на базе расчетной модели в цилиндрической системе координат, показанной на рис. 2.

В этом случае даже одномерное решение в общем виде получается с помощью специализированных функций Бесселя, что сильно усложняет расчет. Предварительные, ориентировочные расчеты цилиндрического линейного асинхронного двигателя удобнее производить с помощью идеализированной модели в декартовой системе координат. Известно, что преобразование электромагнитной энергии

цилиндрического линейного асинхронного двигателя происходит непосредственно в зазоре, при этом относительная погрешность расчёта при переходе от цилиндрической системы координат к декартовой, в зависимости от варианта конструкции, не превышает 2,5 %, что вполне допустимо для предварительных расчётов.

1. Принятые допущения

1. Ферромагнитные сердечники индуктора с магнитной проницаемостью $\mu_c = \infty$, электропроводностью $\gamma_c = 0$ по направлению оси X имеют бесконечные размеры, а длина машины $L = 2p\tau$.

2. Ширина машины по направлению оси Y бесконечно велика.

3. Сердечники индуктора лишены пазов, а их влияние учитывается соответствующим увеличением зазора.

4. Первичная обмотка создает синусоидальную бегущую волну тока по оси X , первичный ток равномерно распределен по всему эквивалентному зазору δ' с плотностью $\dot{J}_1 = J_m \cos(\omega t - \alpha x)$ и направлен по оси Y .

5. Магнитная проницаемость зазора во всех зонах равна μ_0 , а индукция в зазоре имеет только одну составляющую, направленную по оси Z .

6. Проводящая среда вторичного элемента полностью заполняет зазор δ' , имеет эквивалентную электропроводность γ и движется с постоянной скоростью v в направлении оси X .

В основу математического исследования электромагнитных процессов цилиндрического линейного асинхронного двигателя положим упрощённую расчётную модель, изображённую на рис. 3, которая получена на основании принятых допущений [11, 12, 13].

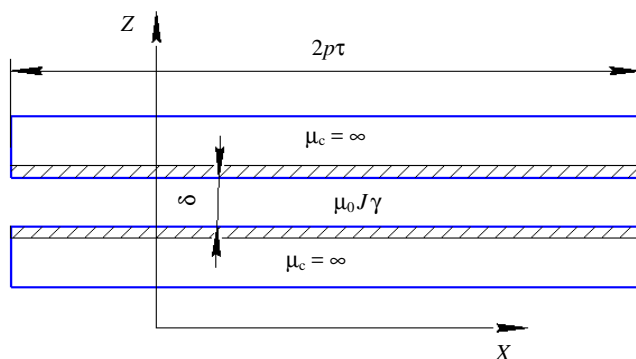


Рис. 3. Цилиндрический линейный асинхронный двигатель в декартовой системе координат

Расчёт интегральных характеристик производится на основании уравнений электромагнитного поля. При принятых допущениях напряженность электрического поля и плотность индуцированного во вторичном элементе тока \bar{J} имеет только одну составляющую, направленную по оси Y .

Дифференциальные уравнения, описывающие электромагнитное поле в зазоре идеализированной модели, могут быть получены из основных уравнений электродинамики [14]:

$$\text{rot}\bar{H} = \bar{J} + \bar{J}_1, \quad (1)$$

$$\text{rot}\bar{E} = -\frac{\partial\bar{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\bar{J} = \gamma[\bar{E} + \bar{u} \times \bar{B}], \quad (3)$$

$$\text{div}\bar{B} = 0, \quad (4)$$

$$\bar{B} = \mu_0\bar{H}, \quad (5)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial\bar{A}}{\partial t} - \text{grad}\phi, \quad (6)$$

где \bar{A} – векторный потенциал электромагнитного поля; ϕ – скалярный потенциал электромагнитного поля,

$$\bar{B} = \text{rot}\bar{A}. \quad (7)$$

Уравнение (7) с учётом (5) может быть записано в виде

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot}\bar{A}. \quad (8)$$

Подставляя (8) в (1), получим:

$$\text{rot rot}\bar{A} = \mu_0\bar{J} + \mu_0\bar{J}_1. \quad (9)$$

С учетом принятых в расчётной модели допущений $A_x = 0$, $A_z = 0$ и $A_y \neq 0$ составляющая магнитной индукции в зазоре по оси Z согласно (7) определяется следующим равенством:

$$B_z = -\frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (10)$$

При одномерном варианте расчёта электромагнитного поля $\text{div}\bar{A} = 0$, поэтому скалярный потенциал ϕ в уравнении (6) будет равен

нулю и потенциальная составляющая напряженности электрического поля $E_{\text{пот}} = -\text{grad } \phi$ также будет равна нулю. В этом случае вихревая составляющая напряженности электрического поля на основании (6) определяется выражением:

$$E_{\text{вих}} = -\frac{\partial A_y}{\partial t}. \quad (11)$$

Составляющая напряженности электромагнитного поля, обусловленная движением проводящей среды относительно магнитного поля согласно (7) и (9) определяется как

$$E_v = \bar{v} \times \bar{B} = -v \frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (12)$$

На основании (3), (11) и (12) плотность индуцированного во вторичной проводящей среде тока может быть записана в следующей форме:

$$J = \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} - \gamma v \frac{\partial A_y}{\partial x}. \quad (13)$$

При принятых допущениях выражение $\text{rot rot } \bar{A}$ в (9) запишем в виде:

$$\text{rot rot } \bar{A} = -\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Уравнение (9) с учётом (13) и (14) запишем следующим образом:

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial A_y}{\partial x} - \mu_0 \gamma \frac{\partial A_y}{\partial t} = -\mu_0 J_1. \quad (15)$$

Уравнение (15) записано для мгновенных значений плотности тока первичной обмотки и векторного потенциала. Для записи этого уравнения в символической форме представим плотность тока и векторный потенциал в виде комплексных чисел:

$$\dot{J}_1 = J_m e^{-j\alpha x} e^{j\omega t}, \quad \dot{A}_1 = A e^{-j\alpha x} e^{j\omega t}. \quad (16)$$

Подставив (16) в уравнение (15), получим

$$\frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial x^2} - \mu_0 \gamma v \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} - j\mu_0 \omega \gamma \dot{A} = -\mu_0 J_m e^{-j\alpha x}. \quad (17)$$

Частное решение A_δ уравнения (17) будем искать в виде векторного потенциала бегущего магнитного поля для бесконечно длинной машины при отсутствии продольного краевого эффекта [15, 16, 17, 18]:

$$\dot{A}_\delta = \dot{A}_m e^{-j\alpha x}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (19), после некоторых преобразований получим:

$$A_m (\alpha^2 + j\mu_0 \omega \gamma S) = \mu_0 J_m,$$

$$A_m = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha^2 + j\mu_0 \omega \gamma S} = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha^2 (1 + j\varepsilon)}, \quad (19)$$

где ε_0 – магнитное число Рейнольдса, которое характеризует интенсивность электромагнитного процесса, $\varepsilon_0 = \frac{j\mu_0 \omega \gamma S}{\alpha^2}$; S – скольжение,

$S = \frac{v_0 - v}{v_0}$; v_0 – скорость движения магнитного поля, $v_0 = 2\tau f_1$; α –

коэффициент полюсного деления, $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$.

Выражение для расчёта мощностей и усилий выводятся аналогично [10]. Основные электромагнитные усилия и мощности, которые развиваются при отсутствии краевых эффектов, определяются следующим образом [16, 17]:

$$F_{эм} = c\delta' 2p\tau \frac{\mu_0 J_m^2}{\alpha} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}, \quad (20)$$

$$P_{эм} = c\delta' 2p\tau \frac{\mu_0 J_m^2}{\alpha^2} \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2}, \quad (21)$$

где c – полуширина двигателя.

Выражения (20) и (21) определяют электромагнитную мощность и тяговое усилие для плоского линейного асинхронного двигателя в декартовой системе координат [19, 20, 21, 22]. Для расчёта цилиндрического линейного асинхронного двигателя необходимо длину окружности цилиндрического вторичного элемента по середине воздушного зазора представить как ширину двигателя в декартовой системе координат:

$$2c = \pi(D_p + 2\Delta + r), \quad (22)$$

где D_p – диаметр вторичного элемента.

Эквивалентная электропроводность вторичного элемента, распределенная в зазоре, определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{\gamma_m \cdot \Delta}{\delta'}, \quad (23)$$

где γ_m – электропроводность материала вторичного элемента; Δ – толщина проводящего материала вторичного элемента.

Число витков фазы индуктора цилиндрического линейного асинхронного двигателя определяется по формуле

$$W_\phi = W_n \cdot n, \quad (24)$$

где W_n – число витков в пазу индуктора; n – число пазов фазы индуктора.

Плотность тока трехфазной обмотки вторичного элемента, равномерно распределённой в зазоре, определяется как

$$J_m = \frac{mW_\phi I \sqrt{2}}{2p\tau\delta'}, \quad (25)$$

где $m = 3$ – число фаз обмотки индуктора; I – действующее значение тока фазы обмотки; τ – длина полюсного деления цилиндрического линейного асинхронного двигателя.

Механическая мощность находится по формуле

$$P_2 = F_{эм} v, \quad (26)$$

где v – скорость движения вторичного элемента, $v = v_0(1 - S)$.

По формулам (20)–(26) производился расчёт интегральных характеристик цилиндрического линейного асинхронного двигателя.

Исходные данные для расчётов при использовании меди, которым покрывается вторичный элемент, указаны в таблице.

Исходные данные

Условные обозначения	Единицы измерения	Значения	Примечание
D_p	м	0,055	Диаметр вторичного элемента
I	А	30	Ток в сети
τ	м	0,03	Полюсное деление
δ	м	0,002	Ширина немагнитного зазора
Δ	м	0,0005	Толщина медного покрытия
W_n		20	Число витков в пазу
m		3	Число фаз
p		16	Число пар полюсов
n		32	Число катушек в фазе
μ_0	Гн/м	$12,56 \cdot 10^{-7}$	Магнитная проницаемость
γ_m	См/м	$0,58 \cdot 10^8$	Проводимость меди
f	Гц	50	Частота сети
S		1–0,1	Скольжение

По выведенным формулам были проведены расчёты и получены зависимости тягового усилия от скольжения (рис. 4), полезной мощности от скольжения (рис. 5) и скорости движения вторичного элемента от скольжения (рис. 6).

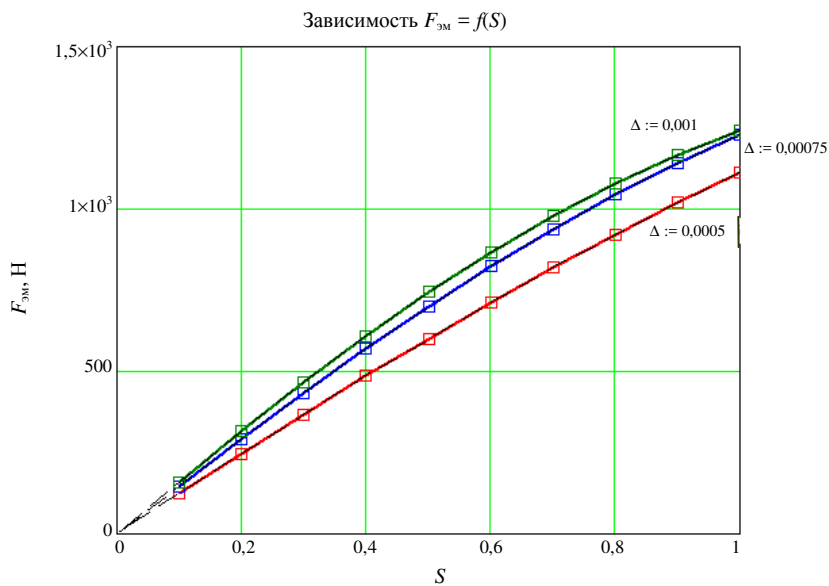


Рис. 4. Зависимость тягового усилия от скольжения

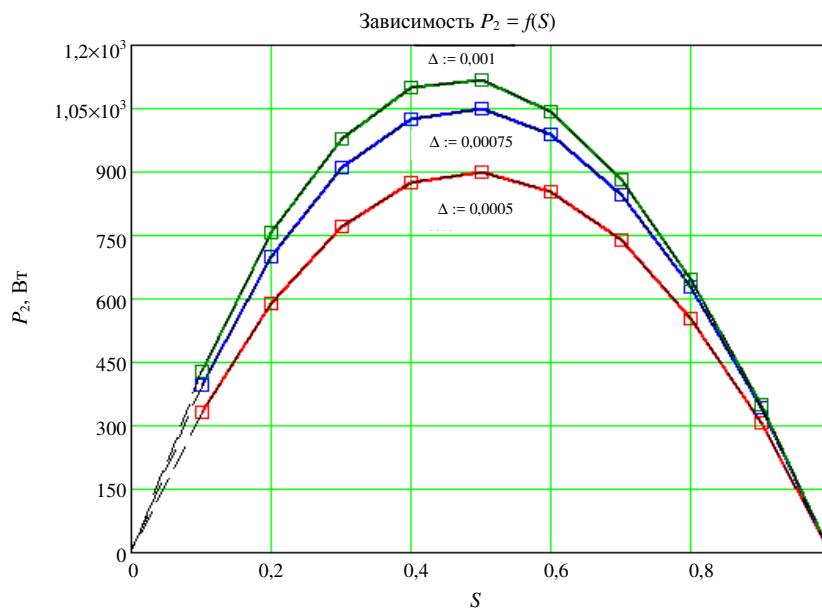


Рис. 5. Зависимость полезной мощности от скольжения

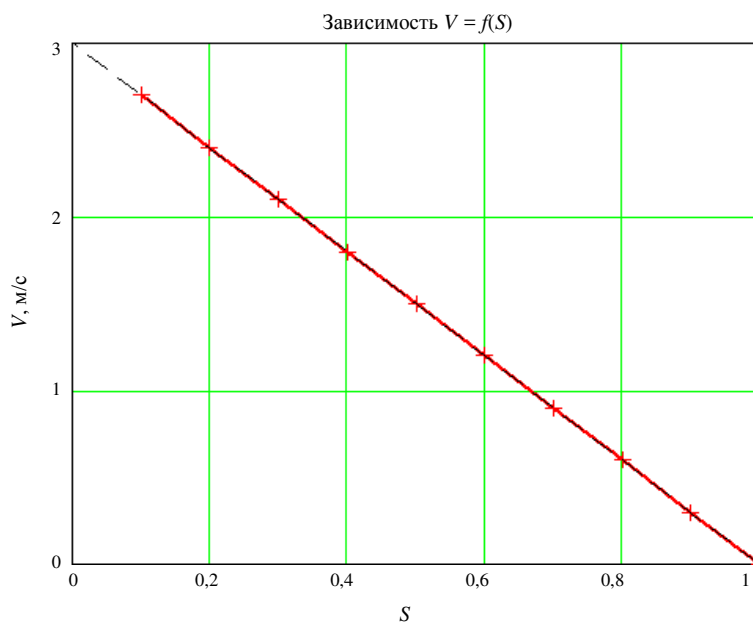


Рис. 6. Зависимость скорости движения вторичного элемента от скольжения

Анализ полученных результатов показывает, что двигатель должен работать в диапазоне скольжений от 0,8 до 0,9 для получения скоростей в пределах от 0,1 до 0,3 м/с, при этом значение тягового усилия для случая, когда вторичный элемент покрывается медью, будет от 140 до 150 кг/с. А значение тягового усилия для случая, когда вторичный элемент покрывается алюминием, будет от 100 до 120 кг/с, что значительно меньше, чем при использовании меди, из-за того, что проводимость алюминия меньше. Большие значения скольжения приводят к уменьшению КПД, к увеличению потерь, следовательно, к дополнительному нагреву двигателя. Использовать данный цилиндрический линейный асинхронный двигатель вполне возможно, но целесообразнее использовать синхронный или вентильный двигатель, у которых скольжение равно нулю [23, 24, 25].

Библиографический список

1. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Семенов В.В., Огарков Е.М., Коротаев А.Д. Специальные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи // Специальные асинхронные электродвигатели для нефтедобычи: монография /

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 286 с.

3. Модернизация оборудования станков-качалок низкодебетных нефтяных скважин / Е.М. Огарков, А.Д. Коротаев, П.Н. Цылёв, А.М. Бурмакин // Научные исследования и инновации: научно-технический журнал. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – №4. – С. 59–65.

4. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А.. Скважинные насосные установки для добычи нефти. – М.: Нефть и газ, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – С. 824.

5. Соколов В.В. Цилиндрические линейные асинхронные двигатели для привода погружных плунжерных насосов: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2006. – 133 с.

6. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса/ А.Т. Ключников, А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 158–162.

7. Окунева Н.А. Разработка и исследование электропривода для нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем: дис. ... канд. техн. наук; Моск. энергет. ин-т. – М., 2008. – 204 с.

8. Кабиров М.М. Гафаров Ш.А. Скважинная добыча нефти. – СПб.: Недра, 2010. – 416 с.

9. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

10. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студ. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.

11. Shulakov N.V., Ogarkov E.M., Burmakin A.M. Equivalent circuit of linear induction motor // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Vol. 81. – № 6. – P. 282–286.

12. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modeling of a cylindrical linear ac electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – № 11. – С. 606.

13. Klyuchnikov A.T. A way to calibrate equations that simulates an induction machine in relative units // Russian Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 83. – № 3. – С. 121–125.

14. Чирков Д.А., Коротаев А.Д., Ключников А.Т. Расчёт основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2016. – Т. 1. – С. 144–149.

15. Огарков Е.М. Теоретическое исследование концевой эффекта линейных асинхронных двигателей // Электрические машины и электромашинные системы: межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. – С. 6–13.

16. Огарков Е.М. Исследование влияния продольных краевых эффектов на статические характеристики линейных асинхронных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1974. – 223 с.

17. Тиунов В.В., Огарков Е.М. Расчёт характеристик линейных индукционных машин с учётом несимметрии, вызываемой продольным краевым эффектом // Специальные системы электропривода: сб. науч. тр. – Пермь, 1973. – № 133. – С. 60–69.

18. Огарков Е.М., Тиунов В.В. Продольный краевой эффект линейных индукционных двигателей с учётом характера распределения поля в концевых зонах // Специальные системы электропривода: сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1973. – № 133. – С. 29–36.

19. Шутемов С.В. Исследование использования цилиндрического вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–4. – С. 795–799.

20. Мирзин А.М., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.

21. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 87. – № 11. – P. 626–629.

22. Shulakov N.V., Shutemov S.V. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor // Russian Electrical Engineering. – 2014. Vol. 85. – № 11. – С. 663–667.

23. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобычных агрегатов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12–4. – С. 795–799.

24. Любимов Э.В., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Обоснование применения цилиндрического линейного вентильного двигателя в нефтедобычных агрегатах // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 3. – С. 94–100.

25. Петрушин А.Д., Шевкунова А.В., Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Исследование эффекта тяжения цилиндрического линейного вентильного электродвигателя // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 62–75.

References

1. Veselovskii O.N., Koniaev A.Iu., Sarapulov F.N. Lineinye asinkhronnye dvigateli [Linear asynchronous engines]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 256 p.

2. Semenov V.V., Ogarkov E.M., Korotaev A.D. Spetsial'nye asinkhronnye elektrodvigateli dlia neftedobychi [Special asynchronous electric engines for oil production]. Spetsial'nye asinkhronnye elektrodvigateli dlia neftedobychi. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014. 286 p.

3. Ogarkov E.M., Korotaev A.D., Tsylev P.N., Burmakin A.M. Modernizatsiia oborudovaniia stankov-kachalok nizkodebetnykh neftianykh skvazhin [Modernization of the equipment for pumping low-well oil wells]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii: nauchno-tekhnicheskii zhurnal*. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, no.4, pp. 59-65.

4. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A.. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlia dobychi nefi [Well pumping installations for oil production]. Moscow: Neft' i gaz, Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nefi i gaza imeni I.M. Gubkina, 2002. 824 p.

5. Sokolov V.V. Tsilindricheskie lineinye asinkhronnye dvigateli dlia privoda pogruzhnykh plunzhernykh nasosov [Cylindrical linear asynchronous engines for driving submersible plunger pumps]. Abstract of Ph.D. thesis. Ekaterinburg, 2006, 133 p.

6. Kliuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Tsilindricheskii lineinyi ventil'nyi elektrodvigatel' dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Cylindrical linear valve engine for submersible rodless pump]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2015, vol. 1, pp. 158-162.

7. Okuneeva N.A. Razrabotka i issledovanie elektroprivoda dlia neftedobyvaiushchikh nasosov s pogruzhnym magnitoelektricheskim dvigatelem [Development and research of electric drive for oil producing pumps with submersible magnetolectric engine]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: Москский энергетический институт, 2008. 204 p.

8. Kabirov M.M. Gafarov Sh.A. Skvazhinnaia dobycha nefi [Downhole oil production]. Saint Petersburg, Nedra, 2010. 416 p.

9. Vol'dek A.I. Induksionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom [Induction magnetohydrodynamic engines with liquid metal working fluid]. Leningrad, Energiia, 1970. 272 p.

10. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. 2nd ed. Moscow: Energiia, 1974, 840 p.

11. Shulakov N.V., Ogarkov E.M., Burmakin A.M. Equivalent circuit of linear induction motor. *Russian Electrical Engineering*, 2010, vol. 81, no. 6, pp. 282-286.

12. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Modeling of a cylindrical linear ac electronic motor. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 11, 606 p.

13. Klyuchnikov A.T. A way to calibrate equations that simulates an induction machine in relative units. *Russian Electrical Engineering*, 2012, vol. 83, no. 3, pp. 121-125.

14. Chirkov D.A., Korotaev A.D., Kliuchnikov A.T. Raschet osnovnykh parametrov tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia po skheme zameshcheniia [Calculation of the main parameters of a cylindrical linear valve engine according to the equivalent circuit]. *Avtomatizatsiia v elektroenergetike i elektrotekhnike*, 2016, vol. 1, pp. 144-149.

15. Ogarkov E.M. Teoreticheskoe issledovanie kontsevogo effekta lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Theoretical study of the end effect of linear asynchronous engines]. *Elektricheskie mashiny i elektromashinnye sistemy. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permskii politekhnicheskii institut, 1987, pp. 6-13.

16. Ogarkov E.M. Issledovanie vliianiia prodol'nykh kraevykh effektov na staticheskie kharakteristiki lineinykh asinkhronnykh dvigatelei [Investigation of the effect of longitudinal edge effects on the static characteristics of linear asynchronous engines]. Abstract of Ph.D. thesis. Perm, 1974, 223 p.

17. Tiunov V.V., Ogarkov E.M. Raschet kharakteristik lineinykh induksionnykh mashin s uchetom nesimmetrii, vzyvaemoi prodol'nym kraevym efektom [Calculation of the characteristics of linear induction machines with regard to asymmetry caused by the longitudinal edge effect]. *Spetsial'nye sistemy elektroprivoda. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permskii politekhnicheskii institut 1973, no. 133, pp. 60-69.

18. Ogarkov E.M., Tiunov V.V. Prodol'nyi kraevoi effekt lineinykh induktsionnykh dvigatelei s uchetom kharaktera raspredeleniia polia v kontsevykh zonakh [Longitudinal edge effect of linear induction engines, taking into account the nature of the field distribution in the end zones]. *Spetsial'nye sistemy elektroprivoda. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm: Permckii politekhnicheskii institut, 1973, no. 133, pp. 29-36.

19. Shutemov S.V. Issledovanie ispol'zovaniia tsilindricheskogo ventil'nogo elektrodvigatel'ia dlia pogruzhnogo besshtangovogo nasosa [Study of the use of a cylindrical valve engine for a submersible shaftless pump]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-4, pp. 795-799.

20. Mirzin A.M., Korotaev A.D., Shutemov S.V. Usilie tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia s postoiannymi magnitami mezhdru statorom i vtorichnym elementom [Tension force of a cylindrical linear permanent magnet valve engine between the stator and the secondary element]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2013, no. 6.

21. Klyuchnikov A.T., Korotaev A.D. The efficiency of the electric motor of a subsurface pump with reciprocating action and losses in a leading-in cable. *Russian Electrical Engineering*, 2016, vol. 87, no. 11, pp. 626-629.

22. Shulakov N.V., Shutemov S.V. A method for calculating the electromagnetic processes in a cylindrical linear electronic motor. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85, no. 11, pp. 663-667

23. Shulakov N.V., Shutemov S.V. Perspektivy ispol'zovaniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v kachestve privoda plunzhernykh neftedobychnykh agregatov [Prospects for the use of a cylindrical linear valve engine as a drive for plunger oil production units]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 12-4, pp. 795-799.

24. Liubimov E.V., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Obosnovanie primeneniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo dvigatel'ia v neftedobychnykh agregatakh [The rationale for the use of a cylindrical linear valve engine in oil production units]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*, 2018, no. 3, pp. 94-100.

25. Petrushin A.D., Shevkunova A.V., Shulakov N.V., Shutemov S.V. Issledovanie effekta tiazheniia tsilindricheskogo lineinogo ventil'nogo elektrodvigatel'ia [Investigation of the effect of tension of a cylindrical linear valve engine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyeologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp. 62-75.

Сведения об авторах

Шапошников Владислав Валерьевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: vladislav96gg@gmail.com).

Коротаев Александр Дмитриевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Токарев Роман Олегович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29, e-mail: ju11071996@yandex.ru).

Чабанов Евгений Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр. 29), доцент кафедры «Технические дисциплины» Волжского государственного университета водного транспорта (Пермский филиал) (614060, Пермь, Гагарина бульвар, 33), e-mail: ceapb@mail.ru).

About the authors

Shaposhnikov Vladislav Valeryevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr. e-mail: vladislav96gg@gmail.com).

Korotaev Aleksandr Dmitrievich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ceapb@mail.ru).

Tokarev Roman Olegovich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ju11071996@yandex.ru).

Chabanov Evgenii Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.), Associate Professor of Department of Technical Disciplines of Volga State University of Water Transport (Perm branch) (614060, Perm, 33, Gagarina bulvar, e-mail: ceapb@mail.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 65.011.56

А.Ш. Зиануров¹, И.А. Вялых²¹ООО «Инфраструктура ТК», Пермь, Россия,²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

АВТОМАТИЗАЦИЯ ГРАДИРНИ УСТАНОВКИ БЛОКА ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ БОВ-6 ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»

На любых промышленных предприятиях существует вопрос охлаждения жидкостей, которые непосредственно используют в производстве или получают в результате работы других установок. Для решения этой проблемы существуют специальные воздушные охладители – промышленные градирни. В настоящее время градирни в основном применяются в системах оборотного водоснабжения для охлаждения теплообменных аппаратов.

В работе выполнен анализ текущего состояния АСУ ТП системы охлаждения оборотной воды на БОВ-6. По результатам анализа произведена модернизация действующей АСУТП. На основе ПЛК Allen-Bradley CompactLogix выполнены следующие задачи:

- разработаны алгоритмы автоматического пуска электродвигателей вентиляторов в градирне в зависимости от их наработки и температуры в коллекторе охлажденной воды КОВ-1;
- разработаны алгоритмы управления пневматическими отсекающими на трубопроводах подачи воды в каждую секцию градирни, с возможностью управления ими с мнемосхемы;
- разработаны алгоритмы управления электрозадвижками на трубопроводах подачи воды из секций в коллектор охлажденной воды, управление которыми осуществляется с мнемосхемы;
- разработан алгоритм регулирования двумя клапанами на линии подпитки с БХО и Камы с целью минимизации финансовых затрат на потребление воды;
- разработан интерфейс оператора для управления технологическим процессом на БОВ-6.

Разработанные алгоритмы проверены на контроллере Allen-Bradley CompactLogix 1769-L35E с эмуляцией объекта автоматизации. Алгоритмы, программы и мнемосхемы подготовлены к внедрению на реально действующем объекте БОВ-6 и позволят снизить нагрузку на оператора путем автоматизации части его функций, таких как поддержание температуры и уровня в КОВ-1, а также автоматического включения в работу секций градирни. При этом будет обеспечен равномерный износ динамического оборудования градирни.

Ключевые слова: градирня, регулирование, CompactLogix, алгоритм, мнемосхема.

A.Sh. Zianurov¹, I.A. Vyalykh²

¹LLC “Infrasrukтура TK”, Perm, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

AUTOMATION OF THE COOLING TOWERS INSTALLATION OF WATER RECYCLING BOV-6 LLC “LUKOIL-PERMNEFTEORGSINTEZ”

There is a question of cooling liquids that are used in the production or obtained as a result of the work of other plants in any industrial enterprise. To solve this problem, there are special air coolers –cooling towers. Cooling towers are mainly used in water recycling systems for cooling heat exchangers at present.

The analysis of the current state of the PCS of the circulating water cooling system at BOV-6 is performed in this work. PCS has been modernized according to the results of the analysis. The following tasks performed with the help of PLC Allen-Bradley CompactLogix:

- algorithms of automatic start-up of fan electric motors in the cooling tower were developed depending on their operating time and on the temperature in the cooled water collector KOV-1;
- algorithms for controlling pneumatic cut-offs on the water supply pipelines to each section of the cooling tower were developed with the possibility of controlling them from the HMI screen;
- algorithms for controlling the electric valves on the water supply pipes from the sections to the chilled water collector were developed which are controlled from the mnemonic scheme;
- the algorithm of regulation of two valves on the feed line with the BHO and Kama was developed with the aim to minimize the financial costs of water consumption;
- HMI screen of process control of BOV-6 was developed.

The algorithm of automatic start-up and stop of cooling towers taking into account operating-out of the equipment, the algorithm of maintenance of level in the reservoir of the cooled water is developed and realized. The necessary HMI screen of process control of BOV-6 was developed. Algorithms, programs and mnemonic schemes are prepared for implementation at the actual operating facility BOV-6 and will reduce the load on the operator by automating some of its functions, such as maintaining the temperature and level in KOV-1, as well as automatically activating the sections of the cooling tower. At the same time, the dynamic equipment of the cooling tower will be evenly worn out.

Keywords: cooling tower, regulation, CompactLogix, algorithm, HMI screen.

Трехсекционная градирня БОВ-6 предназначена для охлаждения технологической циркуляционной воды на производстве ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез».

Цель работы градирни – обеспечение непрерывного охлаждения нагретой воды до заданной температуры. Характеристики градирни представлены в таблице.

Каждая секция градирни имеет расчетную производительность 3000 м³/ч, при температуре воды на входе 35 °С. Структурная схема процесса охлаждения воды на БОВ-6 представлена на рис. 1. Параметром контроля является температура охлажденной воды в коллекторе охлажденной воды (КОВ-1). Охлаждение нагретой воды производится в каждой секции градирни путём принудительного воздушного обдува [1, 5, 9, 19].

Характеристики градирни

Характеристика	Численное значение	Единицы измерения
Расчетный расход воды на градирню	3000	м ³ /ч
Температура воды на входе в градирню	+35	°С
Температура воды на выходе из градирни	+23,5	°С
Расчетная относительная влажность воздуха	50	%
Температура атмосферного воздуха	+27,0	°С
Температура воздуха на входе по влажному термометру	+20,0	°С
Барометрическое давление	99,0	кПа
Величины расчетных нагрузок:		
Ветровая нагрузка	0,30	кПа
Снеговая нагрузка	3,2	кПа
Сейсмичность	7	баллов

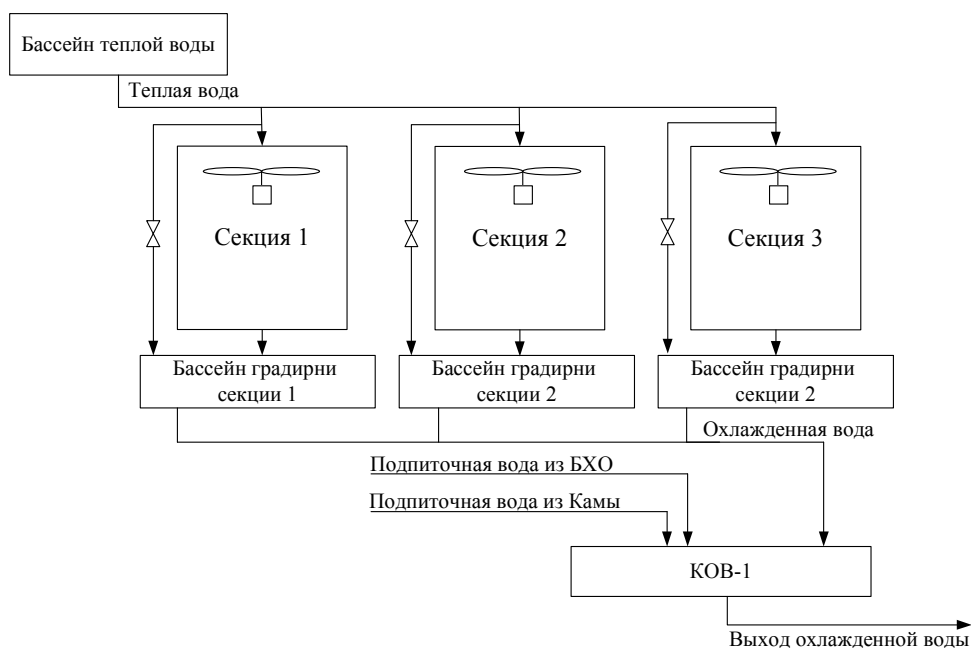


Рис. 1. Структурная схема процесса охлаждения воды на БОВ-6

На трубопроводах подачи воды в каждую секцию градирни и на байпасной линии установлены ручные задвижки, которые приходится оператору открывать или закрывать вручную. На трубопроводах подачи воды из секций в бассейн охлажденной воды установлены также ручные задвижки. Пуск вентиляторов градирни и поддержание темпе-

ратуры в КОВ-1 осуществляются в ручном режиме оператором путем изменения частоты вращения вентиляторов в секциях БОВ-6. При этом в зависимости от температуры в бассейне оператор вручную включает в работу необходимое количество секций.

Исходя из вышеизложенного, предложено следующее:

- разработать алгоритм автоматического пуска электродвигателей вентиляторов в градирне в зависимости от их наработки и температуры в коллекторе охлажденной воды КОВ-1;

- заменить ручные задвижки на трубопроводах подачи воды в каждую секцию на пневматические отсекатели для удаленного управления ими;

- заменить ручные задвижки на трубопроводах подачи воды из секций в коллектор охлажденной воды на электрозадвижки, управление которыми осуществляется с мнемосхемы;

- установить регулирующий клапан на линии подпитки с Камы с целью минимизировать финансовые затраты на потребление воды из реки Камы;

- разработать необходимые мнемосхемы для управления технологическим процессом БОВ-6.

Для решения задач задействована система управления непрерывными процессами RSLogix5000 на базе ПЛК Allen-Bradley CompactLogix1769-L35E производства компании Rockwell [2, 6, 10, 16, 18]. Были выбраны следующие модули ввода/вывода:

- модуль аналогового входа: 1769-IF16 (16 входов);
- модуль аналогового выхода: 1769-QF8C (8 выходов);
- модуль дискретного входа: 1769-IQ32 (32 входов);
- модуль дискретного выхода: 1769-QB32 (32 выходов).

ПЛК Allen-Bradley CompactLogix1769-L35E с выбранными модулями ввода/вывода представлен на рис. 2.



Рис. 2. ПЛК Allen-Bradley CompactLogix1769-L35E

В результате работы были достигнуты следующие результаты:

1. Разработан алгоритм автоматического пуска электродвигателей вентиляторов в градирне в зависимости от наработки и температуры в бассейне охлажденной воды КОВ-1. При необходимости охлаждения оборотной воды включается в работу секция с наименьшей наработкой, аналогично при выводе из работы выключается секция с наибольшей наработкой [3, 7, 8, 17]. Блок-схема расчета наработки электродвигателей вентиляторов секций градирни представлена в виде подпрограммы Narabotka на рис. 3 (звездочкой обозначены наработки вентиляторов). Фрагмент подпрограммы представлен на рис. 4.

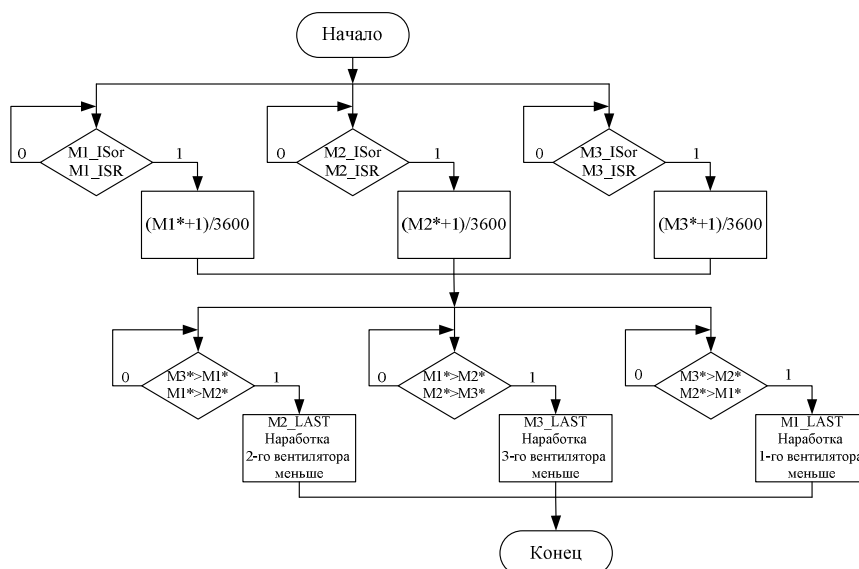


Рис. 3. Блок-схема подпрограммы Narabotka расчета наработки электродвигателей вентиляторов секций градирни

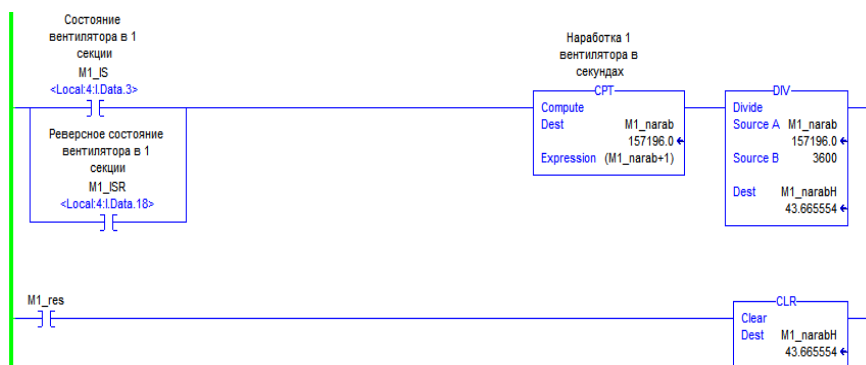


Рис. 4. Подпрограмма Narabotka расчета наработки электродвигателей вентиляторов секций градирни

Блок-схема автоматического пуска электродвигателей вентиляторов в зависимости от наработки и от температуры представлена в виде подпрограммы PUSK на рис. 5 (звездочкой обозначены наработки вентиляторов). Фрагмент подпрограммы представлен на рис. 6.

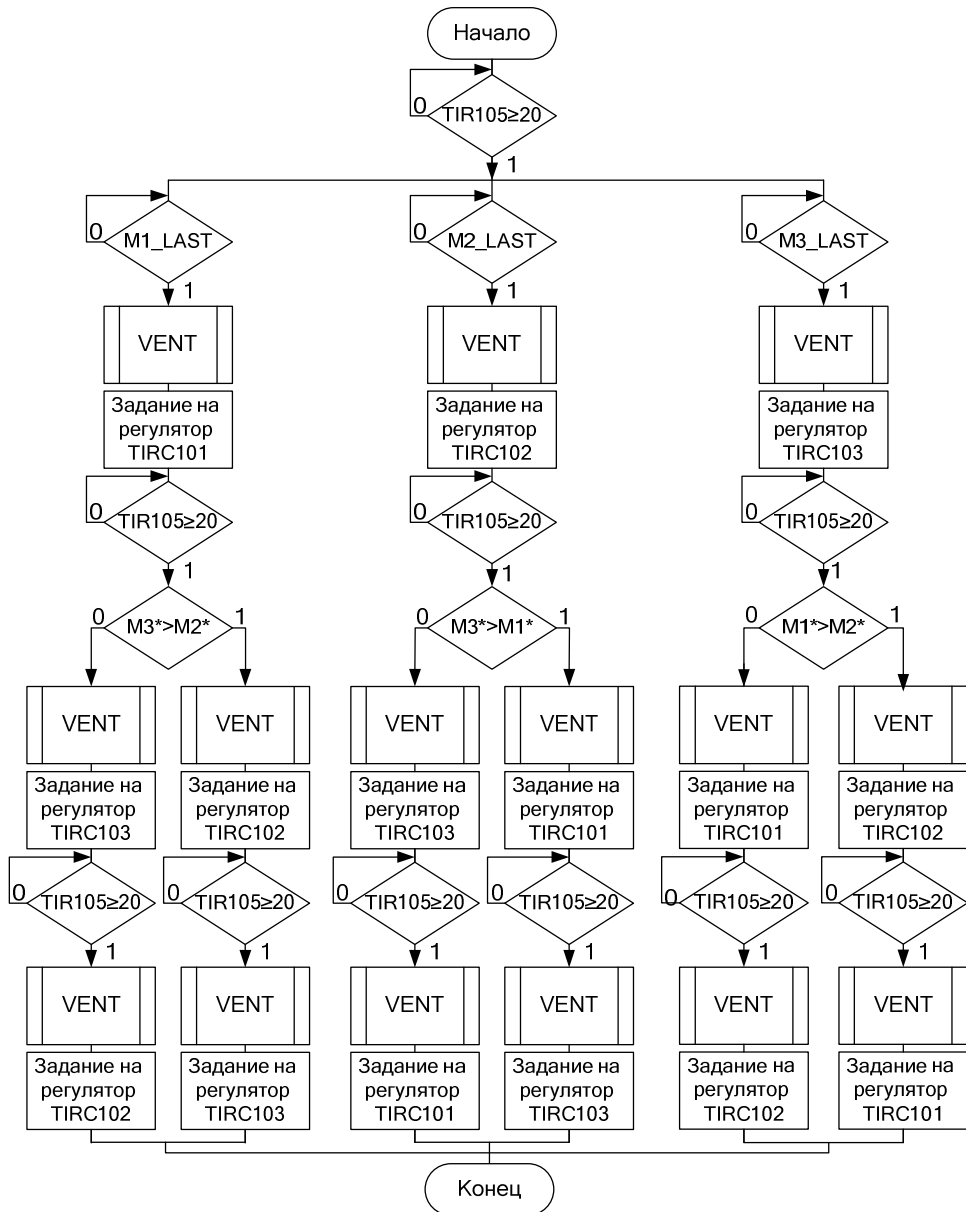


Рис. 5. Блок-схема подпрограммы PUSK автоматического пуска электродвигателей вентиляторов в зависимости от наработки и от температуры

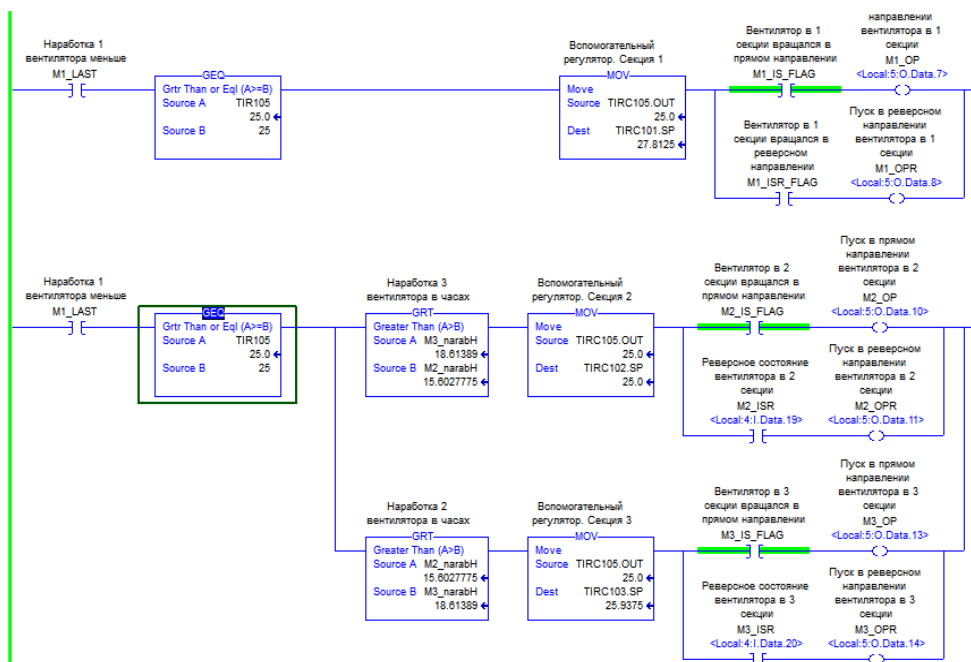


Рис. 6. Подпрограмма PUSK расчета наработки электродвигателей вентиляторов секций градирни

2. Разработан алгоритм поддержания уровня в КОВ-1 двумя клапанами [11, 14, 15, 20]. Регулирование уровня в резервуаре осуществляется клапаном на трубопроводе подпитки из БХО. При открытии клапана на линии из БХО на 100 % в работу включается клапан на линии питания из реки Камы. Фрагмент подпрограммы поддержания уровня в КОВ-1 двумя клапанами представлен на рис. 7.

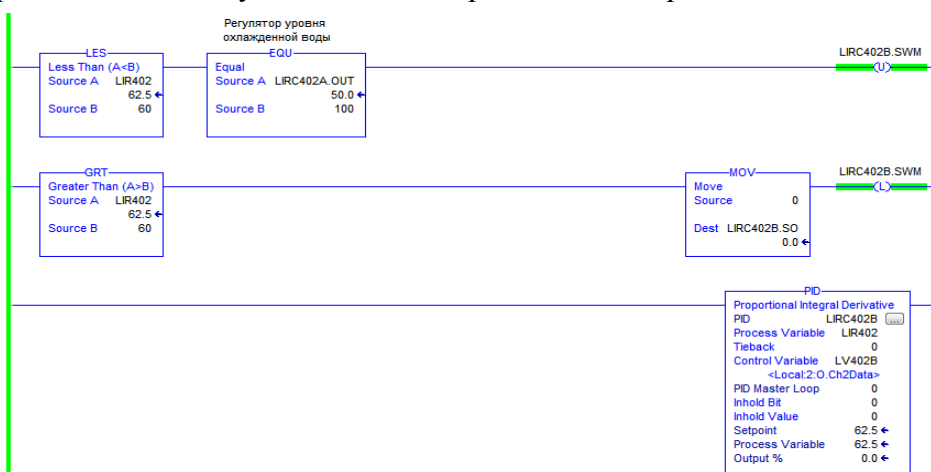


Рис. 7. Подпрограмма LEVEL поддержания уровня в КОВ-1 двумя клапанами

3. При помощи графического редактора FactoryTalkv.8.10 разработаны мнемосхема, графические тренды, шейпы, детальные панельки по аналоговым сигналам и электрооборудованию [4, 12, 13]. Мнемосхема для управления технологическим процессом БОВ-6 представлена на рис. 8.

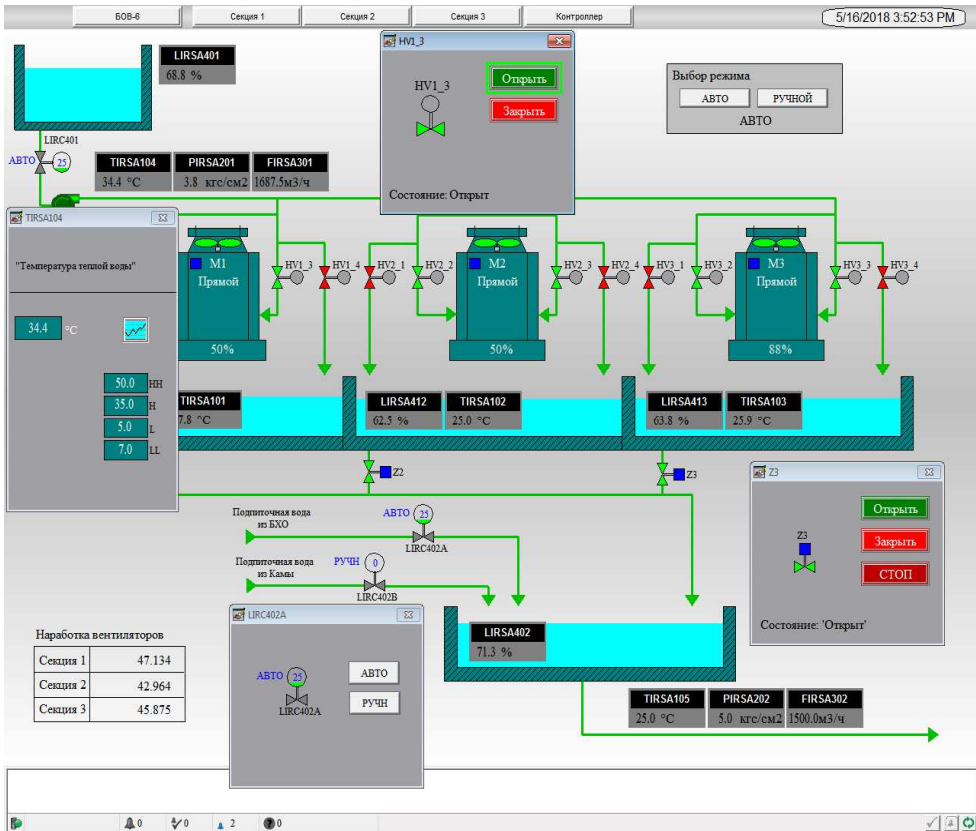


Рис. 8. Мнемосхема для управления технологическим процессом БОВ-6

Выводы. Разработанные алгоритмы проверены на контроллере Allen-Bradley CompactLogix1769-L35E с эмуляцией объекта автоматизации. Алгоритмы, программы и мнемосхемы подготовлены к внедрению на реально действующем объекте БОВ-6 и позволят снизить нагрузку на оператора путем автоматизации части его функций, таких как поддержание температуры и уровня в КОВ-1, а также автоматического включения в работу секций градирни. При этом будет обеспечен равномерный износ динамического оборудования градирни.

Библиографический список

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995.
2. Руководство по выбору Compact Logix Editon. Rockwell Automation, 1999 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vdtua.com/_docs/Doc/PLC/CompactLogix/1769-SG001E-RU-P.pdf (дата обращения: 25.06.2018).
3. Основные инструкции программируемых контроллеров Allen-Bradley: справ. руководство, 1999 [Электронный ресурс]. – URL: https://literature.rockwellautomation.com/1785-um001_-ru-p.pdf (дата обращения: 25.06.2018).
4. Руководство пользователя Factory Talk View Site Editon. Rockwell Automation, 1999 [Электронный ресурс]. – URL: https://literature.rockwellautomation.com/viewse-um006_en-e.pdf (дата обращения: 25.06.2018).
5. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 352 с.
6. Руководство по применению RSLogix5000. Rockwell Software, 1999 [Электронный ресурс]. – URL: https://forte21.ru/fi/cat_rockkwell/_209_9399-RL5KGR-RU.pdf (дата обращения: 25.06.2018).
7. Микропроцессорные системы и средства. Подготовка и настройка контроллера Allen-BradleyLogix 5000: метод. указания / сост. З.Х. Ягубов, Ю.В. Лычаков, Л.К. Шадрина. – Ухта: Изд-во УГТУ, 2010. – 28 с.
8. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
9. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: учеб. – М.: Академкнига, 2007. – 690 с.
10. Жмакин А.П. Архитектура ЭВМ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 320 с.
11. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
12. Советов Б.Я. Моделирование системы. – М.: Высшая школа, 2003. – 343 с.
13. Клюев А.С. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 355 с.
14. Шишмарев В.Ю. Автоматизация технологических процессов. – М.: Академия, 2005. – 352 с.

15. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП: учеб. пособие для студ. спец. 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» (по отраслям). – СПб: Изд-во СПбГЛТА, 2006. – 152 с.

16. Руководство для ускоренной подготовки к работе семейством программируемых контроллеров RSLogix5000. Rockwell Automation, 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <http://lib.znate.ru/docs/index-193681.html> (дата обращения: 25.06.2018).

17. Общая методика для программируемых контроллеров RSLogix5000. Руководство по программированию, 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <http://samsebeplc.ru/Doc/AB/1756-pm0016.pdf> (дата обращения: 25.06.2018).

18. Официальная документация контроллеров Allen-Bradley, Rockwell Automation [Электронный ресурс]. – URL: <https://literature.rockwellautomation.com> (дата обращения: 25.06.2018).

19. Беспалов А.В., Грунский В.Н., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами. Иллюстративные материалы: учеб. пособие. – М.: Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012. – 76 с.

20. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

References

1. Dytnerskii Iu.I. Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii [Processes and apparatus of chemical technology]. Moscow: Khimiia, 1995.

2. Rukovodstvo po vyboru Compact Logix [CompactLogix Selection Guide]. Rockwell Software, 1999, available at: http://www.vdt-ua.com/_docs/Doc/PLC/CompactLogix/1769-SG001E-RU-P.pdf (accessed 25 June 2018).

3. Osnovnye instruksii programmiruemykh kontrollerov Allen-Bradley: spravochnoe rukovodstvo [Basic instructions for programmable controllers Allen-Bradley. Referenceguide]. Rockwell Automation, 1999, available at: https://literature.rockwellautomation.com/1785-um001_ru-p.pdf (accessed 25 June 2018).

4. Rukovodstvo pol'zovatelia Factory Talk View Site Editon [User guide FactoryTalk View Site Editon]. Rockwell Automation, 1999, available at: https://literature.rockwellautomation.com/viewse-um006_en-e.pdf (accessed 25 June 2018).

5. Pletnev G.P. Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v teploenergetike [Automation of technological processes and productions in power system]. Moscow: Moskovskii ekonomicheskii institut, 2007. 352 p.

6. Rukovodstvo po primeneniiu RSLogix5000 [Guidance on the application of RSLogix5000]. Rockwell Software, 1999, available at: https://forte21.ru/fi/cat_rockwell/_209_9399-RL5KGR-RU.pdf (accessed 25 June 2018)

7. Iagubov Z.Kh., Lychakov Iu.V., Shadrina L.K. Mikroprotsessornye sistemy i sredstva. Podgotovka i nastroyka kontrollera Allen-BradleyLogix 5000: metodicheskie ukazaniia [Microprocessor systems and facilities. Preparing and configuring the Allen-Bradley RSLogix 5000 controller]. Ukhta: Ukhtinskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010. 28 p.

8. Fedorov Iu.N. Spravochnik inzhenera po ASUTP: Proektirovanie i razrabotka [The reference book of the engineer on the ASUTP: Design and development]. Moscow: Infra-Inzheneriia, 2008. 928 p.

9. Bepalov A.V., Kharitonov N.I. Sistemy upravleniia khimiko-tekhnologicheskimi protsessami [Control systems of chemical-technological processes]. Moscow: Akademkniga, 2007. 690 p.

10. Zhmakin A.P. Arkhitektura EVM [Computer architecture]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006. 320 p.

11. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analiz i sintez khimiko-tekhnologicheskikh sistem [Analysis and synthesis of chemical-technological systems]. Moscow: Khimiia, 1991. 432 p.

12. Sovetov B.Ia. Modelirovanie sistemy [Modeling the system]. Moscow: Vysshaia shkola, 2003. 343 p.

13. Kliuev A.S. Naladka sredstv avtomatizatsii i avtomaticheskikh sistem regulirovaniia [Commissioning of automation and control systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 355 p.

14. Shishmarev V.Iu. Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh protsessov [Automation of technological processes]. Moscow: Akademiia, 2005. 352 p.

15. Ztiurin V.A. Avtomatizirovannye sistemy upravleniia tekhnologicheskimi protsessami. Osnovy ASUTP: uchebnoe posobie dlia studentov spetsial'nosti 220301 "Avtomatizatsiia tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv" po otrasliam [Automated process control systems. Fundamentals of Automated Process Control Systems: textbook for students of the specialty 220301 Automation of technological processes and production" (by industry)]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova, 2006. 152 p.

16. Rukovodstvo dlia uskorennoi podgotovki k rabote semeistvom programmiruemykh kontrollerov RSLogix 5000 [Guide for accelerated training to work with family of programmable controllers RSLogix 5000]. Rockwell Automation, 2017, available at: <http://lib.znate.ru/docs/index-193681.html> (accessed 25 June 2018).

17. Obshaia metodika dlia programmiruemykh kontrollerov RSLogix 5000. Rukovodstvo po programmirovaniiu [A common methodology for programmable controllers RSLogix5000. Programming manual]. Rockwell Automation, available at: <http://samsebeplc.ru/Doc/AB/1756-pm0016.pdf> (accessed 25 June 2018).

18. Ofitsial'naia dokumentatsiia kontrollerov Allen-Bradley [Official documentation of Allen-Bradley controllers]. Rockwell Automation, available at: <https://literature.rockwellautomation.com> (accessed 25 June 2018).

19. Bespalov A.V., Grunskii V.N., Kharitonov N.I. Sistemy upravleniia khimiko-tekhnologicheskimi protsessami. Illiustrativnye materialy [Control systems for chemical-technological processes]. Moscow: Rossiiskii khimiko-tekhnologicheskii universitet imeni D.I. Mendeleeva, 2012. 76 p.

20. Rotach V.Ia. Teoriia avtomaticheskogo upravleniia teploenergeticheskimi protsessami: uchebnik dlia vuzov [Theory of automatic control]. Moscow: Energoatomizdat. 1985. 296 p.

Сведения об авторах

Зиануров Алмаз Шамильевич (Пермь, Россия) – инженер по АСУ ТП ООО «Инфраструктура ТК» (614016, Пермь, Глеба Успенского, 15а, e-mail: al.zia96@yandex.ru).

Вялых Илья Анатольевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: atp@pstu.ru).

About the authors

Zianurov Almaz Shamilyevich (Perm, Russian Federation) is an Engineer on APCS of LLC "Infrastructura TK" (614016, Perm, 15a, Gleba Uspenskogo str., e-mail: al.zia96@yandex.ru).

Vyalykh Ilya Anatolevich (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor Department of automation technological processes Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: atp@pstu.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 004.056.5

А.С. Шабуров А.С. НикитинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК
НА ОБЪЕКТЫ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Проведен краткий анализ проблемы компьютерных атак как наиболее опасной формы воздействия на объекты критической информационной инфраструктуры. Отмечены особенности традиционных компьютерных атак. Приведена характеристика таргетированной компьютерной атаки, рассмотрены ее особенности. Приведены тенденции к увеличению угроз данного типа. Обоснована необходимость совершенствования систем обнаружения вторжений и выявления компьютерных атак. Представлена задача обнаружения атаки на уровне правил. Сформулированы проблемы классического подхода при формировании правил. Предложен подход для решения задачи обнаружения вторжений на основе машинного обучения, обладающий перечнем преимуществ и недостатков. Сформулированы требования для исключения возможных недостатков распознавания компьютерной атаки. Представлена схема сети лабораторной установки, использованной для записи анализируемого трафика, с последующим выявлением признаков компьютерной атаки. Сформулированы преимущества выбранной модели. Построены графики, иллюстрирующие асимптотическую сложность подходов к классификации трафика, предикат разбиения по индексу Джини. Приведен пример вершины дерева решений, используемого в ансамбле, а также трёх первых уровней дерева решений. Сформулирована метрика качества полученной модели. Проведена оценка модели посредством кросс-валидации на пяти выборках, а также оценена ее точность. В ходе экспериментов над разработанной моделью построена матрица ошибок. Проанализированы результаты и сделаны необходимые выводы о достаточной эффективности разработанной модели. Приведен ранжированный список параметров, которые модель посчитала важными для принятия решения. Проведена оценка работы построенной модели с точки зрения выбранных признаков параметров соединения. Сформулированы направления работы для совершенствования построенной модели.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура, компьютерная атака, защита информации, система обнаружения вторжений, метод обнаружения аномалий, анализ сигнатур.

A.S. Shaburov, A.S Nikitin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE MODEL FOR DETECTING COMPUTER ATTACKS ON OBJECTS OF CRITICAL INFORMATION INFRASTRUCTURE

In this paper was made a brief problem analysis of computer attacks as the most dangerous form of exposure to objects of critical information infrastructure. Features of traditional computer attacks were noted. The characteristic of targeted computer attack was given and its features were considered. The trends to an increase in threats of this type were given. The necessity of improving intrusion detection systems and detecting computer attacks has been substantiated. The task of detecting attacks at the rule level was presented. The problems of the classical approach were formulated while forming the rules. An approach for solving the problem of intrusion detection, based on machine learning, has a list of advantages and disadvantages. Requirements were formulated to eliminate possible deficiencies in the recognition of a computer attack. A diagram of the laboratory setup network used to record the analyzed traffic was presented with the subsequent signs identification of a computer attack. The advantages of the selected model were formulated. Graphs illustrating the asymptotic complexity of approaches to traffic classification, predicate partitioning by the Gini index were constructed. An example was given of the vertex of the decision tree used in the ensemble, as well as the first five levels of the decision tree. The quality metric of the resulting model was formulated. The model was evaluated by cross-validation on five samples and its accuracy was estimated. During the experiments on the developed model an error matrix was constructed. The results were analyzed and the necessary conclusions were drawn about the sufficient effectiveness of the developed model. A ranked list of parameters that the model deemed important for decision making was given. The evaluation of the work of the constructed model, in terms of the selected features of the parameters of the connection, has been carried out. The directions of work for the improvement of the constructed model were formulated.

Keywords: critical information infrastructure, computer attack, information security, intrusion detection system, anomaly detection method, signature analysis.

В последнее время значительно обострилась проблема компьютерных атак на информационные системы различного назначения и топологий. Под компьютерной атакой (КА) понимается целенаправленное воздействие на информационные системы и информационно-телекоммуникационные сети программно-техническими средствами, осуществляемое в целях нарушения безопасности информации в этих системах и сетях.

Традиционно обеспечение безопасности информационных систем (ИС) осуществлялось посредством защиты от типовых массовых информационных атак, таких как компьютерные вирусы, мошенничество, сетевые атаки, внутренние утечки и т.д. Типовые системы защиты информации стали иметь шаблонный вид и содержать в себе набор определенных, однотипных функциональных средств, таких как межсетевые экраны, антивирусные средства и т.п., которые позволяют противостоять традиционным КА. При этом, как показала практика, при

осуществлении воздействия на ИС более сложных по сценарию реализации и используемым технологиям атак, традиционные средства не обеспечивают заданный уровень безопасности информации.

Кроме того, тенденцией последних лет стало появление узконаправленных компьютерных атак (целевых, таргетированных), целью которых являются конкретные коммерческие или государственные организации и их вычислительные сети. Большинство аналитических прогнозов, проводимых в данной области, свидетельствует о том, что в ближайшее время количество подобных атак будет активно возрастать [1, 2, 3]. Это обуславливает необходимость исследования проблемы и поиска эффективных с точки зрения защищенности информационной составляющей, решений.

Значительную роль в повышении эффективности ИС сыграло внедрение современных комплексных подходов к безопасности (DLP, SIEM, IDS). В то же время не все из комплексных и дорогостоящих решений в области информационной безопасности позволяли решить проблему компьютерных атак.

Разнообразие вариантов негативного информационного воздействия, которые могли бы служить объектами исследований, требует разработки их адекватного модельного представления с учетом сохранения адекватности модели действительному образу атаки. Понятие адекватности моделей следует рассматривать в двух аспектах: адекватность прототипу (корректность описания соответствующей атаки) и адекватность главной цели – применение адекватных мер противодействия со стороны системы защиты информации [4].

Одной из наиболее важных с точки зрения обнаружения и локализации КА на ИС является система обнаружения вторжений [5]. Разработка систем обнаружения вторжений (intruder detection system, IDS), как правило, выполняется с использованием списка правил (сигнатур) [6, 7].

Решение задачи обнаружения атаки на уровне правил, составленных администратором безопасности, имеет следующий вид (например, правила для IDS с открытым исходным кодом Suricata):

```
alert tcp $EXTERNAL_NET any -> $NET $SSH_PORT
(msg:"Possible SSH brute forcing!"; threshold: type both, track by_src,
count 5, seconds 30; sid:1;)
```

При этом существуют проблемы классического подхода формирования правил:

1. Сложность составления правил и рассмотрения всех возможных случаев атак.

2. Постоянная угроза возможности появления новых способов проникновения в сеть, для которых ещё не обновлены правила в IDS.

В данной статье предлагается иной подход к решению задачи обнаружения вторжений, на основе машинного обучения, к преимуществам которого можно отнести [6]:

1. Возможность работы в изменяющихся условиях без переконфигурирования системы.

2. Возможность обнаружения новых, ранее не исследованных угроз сетевой безопасности.

3. Отсутствие высоких требований к уровню технических знаний и квалификации администраторов безопасности.

При этом к недостаткам предлагаемого подхода, обусловленным стохастической природой алгоритмов ML, можно отнести следующие проблемы [5]:

1) неполное обнаружение угроз;

2) ложные срабатывания системы обнаружения вторжений;

3) невозможность определить основание принятия определенного решения предлагаемым алгоритмом.

Невозможность исключения вышеназванных недостатков требует выполнения следующих требований:

1) выбора такой последовательности и параметров алгоритмов машинного обучения, которые могут быть легко интерпретируемы;

2) выбора такого алгоритма, решения которого могут быть похожи на ход мыслей человека (администратора безопасности сети);

3) выбора наиболее быстрого алгоритма выполнения задачи, способного оперативно обрабатывать трафик в режиме реального времени.

Для разработки модели обнаружения компьютерных атак использована база данных UNSW-NB 15, разработанная сотрудниками Cyber Range Lab of the Australian Centre for Cyber Security [8, 9].

На рис. 1 представлена схема сети лабораторной установки, использованной для записи анализируемого трафика, с последующим выявлением признаков КА.

В настоящее время разработано множество подходов для извлечения информации о сетевых соединениях для последующего интеллектуального анализа [10, 11, 12], в том числе решения, спроектированные

с целью получения максимальной производительности для обработки больших объёмов данных в режиме реального времени [13, 14]. Для машинного обучения были использованы параметры данных, часть из которых представлена на рис. 2.

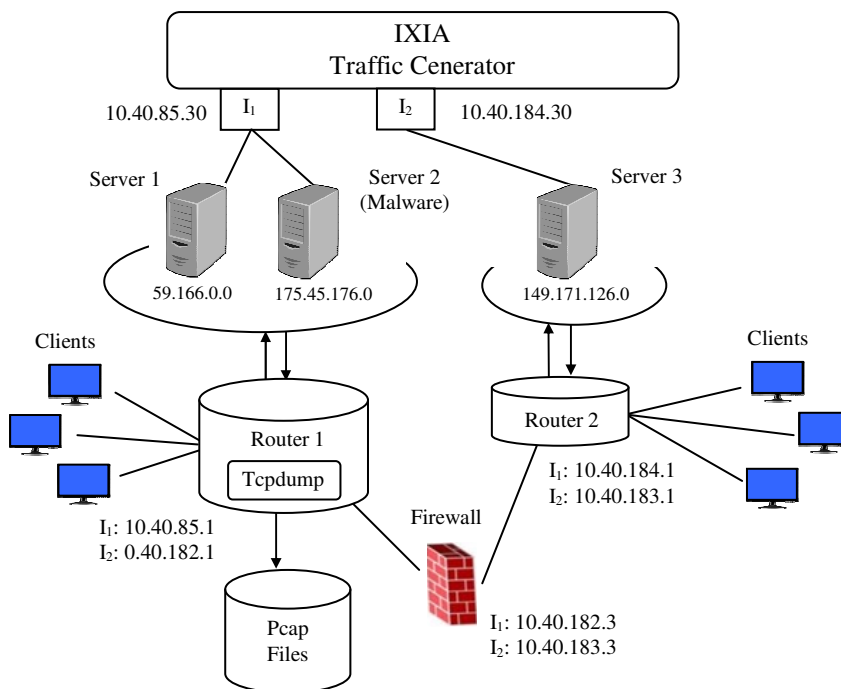


Рис. 1. Схема сети лабораторной установки, использованной для записи трафика

No.	Name	Type	Description
1	srcip	nominal	Source IP address
2	sport	integer	Source port number
3	dstip	nominal	Destination IP address
4	dsport	integer	Destination port number
5	proto	nominal	Transaction protocol
6	state	nominal	Indicates to the state and its dependent proto...
7	dur	Float	Record total duration
8	sbytes	Integer	Source to destination transaction bytes
9	dbytes	Integer	Destination to source transaction bytes
10	sttl	Integer	Source to destination time to live value
11	dttl	Integer	Destination to source time to live value
12	sloss	Integer	Source packets retransmitted or dropped

Рис. 2. Список части параметров используемых данных

В качестве модели машинного обучения предложен случайный лес (бэггинг на деревьях принятия решений). При этом выделены преимущества выбранной модели [15]:

1) скорость работы алгоритма: параллельная работа каждого из деревьев, а также логарифмическая асимптотика спуска по дереву: на рис. 3 представлены оценки сложности классического и предлагаемого подходов систем классификации сетевого трафика;

2) возможность интерпретации: деревья решений предоставляют возможность получить данные о том, насколько часто каждый из критериев задействован для задач классификации.

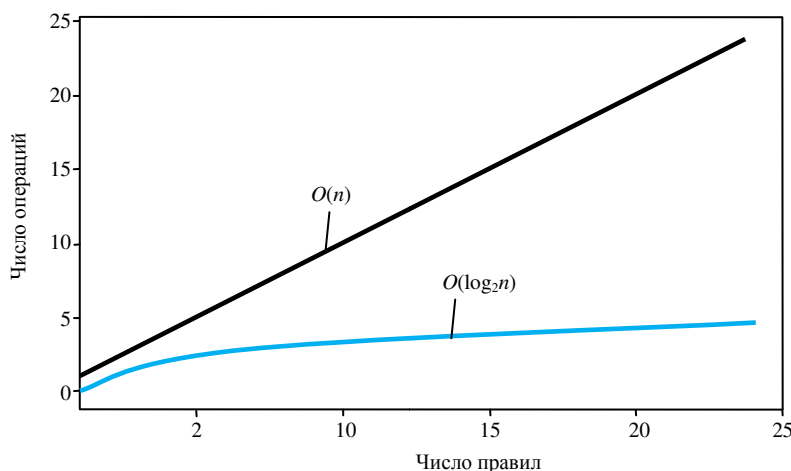


Рис. 3. Асимптотическая сложность подходов к классификации трафика: $O(n)$ – классический подход; $O(\log_2 n)$ – подход с использованием решающих деревьев

Получаем предикат разбиения по индексу Джини:

$$H = \sum_{k=1}^K p_k \cdot (1 - p_k). \quad (1)$$

Таким образом, получаем вершины дерева вида, представленного на рис. 4. С каждой вершиной ассоциируется предикат разбиения выборки по некоторому параметру, а также оценивается качество разбиения, в данном случае, используя индекс Джини.

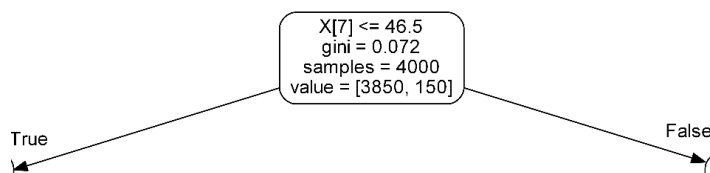


Рис. 4. Пример вершины дерева решений, используемого в ансамбле

Разбиваясь на две группы, наблюдения снова разбиваются и так далее, получая дерево решений, пример которого представлен на рис. 5. Разбиение заканчивается, когда будет выполнено одно из условий остановки построения дерева решений. Как правило, это ограничение на количество разбиений, высоту дерева, количество наблюдений, ассоциированных с листовой вершиной и пр.

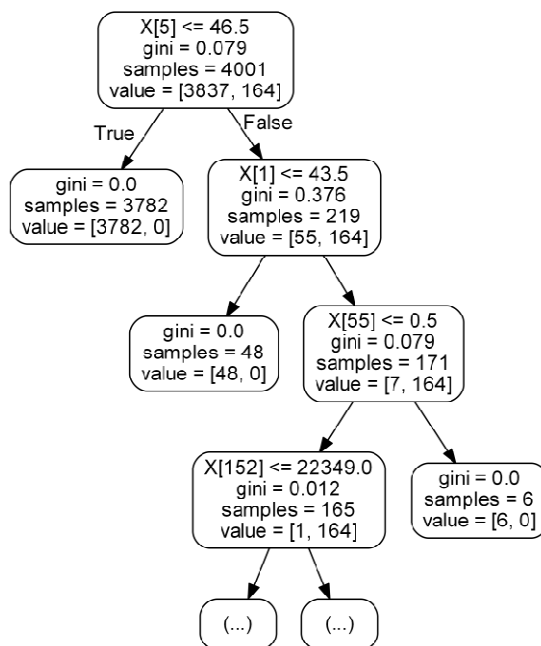


Рис. 5. Пример трёх первых уровней дерева решений

В качестве метрики качества полученной модели была выбрана F-мера – гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall) [16]:

$$F1score = \frac{2 \cdot precision \cdot recall}{precision + recall}, \quad (2)$$

где

$$recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

$$precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (4)$$

где TP – верно распознанные вредоносные соединения; FP – false positive, ошибки первого рода; FN – false negative, ошибки второго рода.

Оценка работы модели осуществлялась посредством кросс-валидации на пяти выборках. Подход позволяет оценить обобщающую способность алгоритма на различных подмножествах данных [17]:

$$\text{score} = \frac{1}{N} \sum_n^N \text{score}_n. \quad (5)$$

Анализ метрик (рис. 6) позволяет сделать вывод о том, что полученная модель имеет достаточную точность определения КА, близкую к 100 %. Однако для задачи классификации с очень несбалансированной выборкой классов (обычных соединений всегда существенно больше, чем вредоносных) наиболее показательными являются метрики precision и recall [18]. Совокупность значений задействованных метрик показывает, что модель достигает приемлемого качества для использования в реальных системах даже при небольшом количестве деревьев принятия решений в ансамбле.

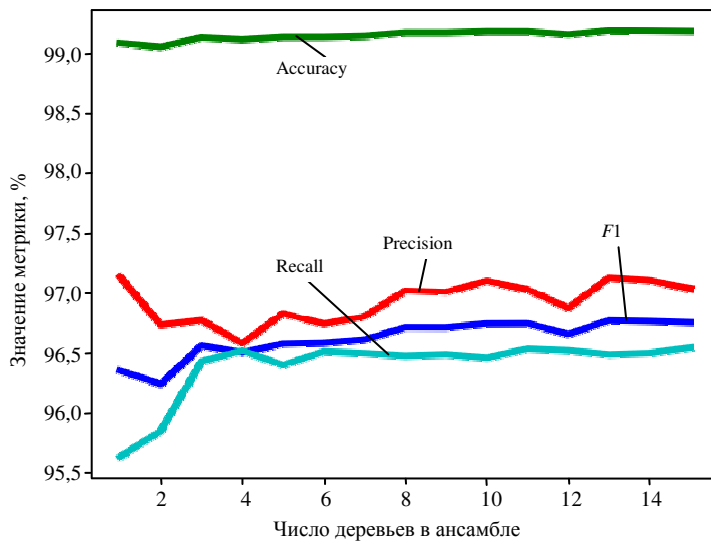


Рис. 6. Метрики полученной модели

В ходе одного из экспериментов над разработанной моделью, была построена матрица ошибок, представленная на рис. 7. Видно, что подавляющая доля тестовых примеров была распознана корректно.

Примечательно, что в ходе эксперимента не было ни одного примера вредоносного соединения, которое было распознано как безопасное. Однако нельзя быть уверенными в том, что это преимущество разработанной модели и подобное свойство будут проявляться на любых других данных.

Ранжированный список параметров, которые модель посчитала важными для принятия решения, следующий: sttl, sport, djit, sintpkt, dtcpb, sbytes, dintpkt, stcpb, dbytes, smeansz, proto_icmp, dsport, dloss, spkts, dpkts, dmeansz, sloss, dttl, proto_tcp, остальные параметры имеют нулевой вклад в решение модели.

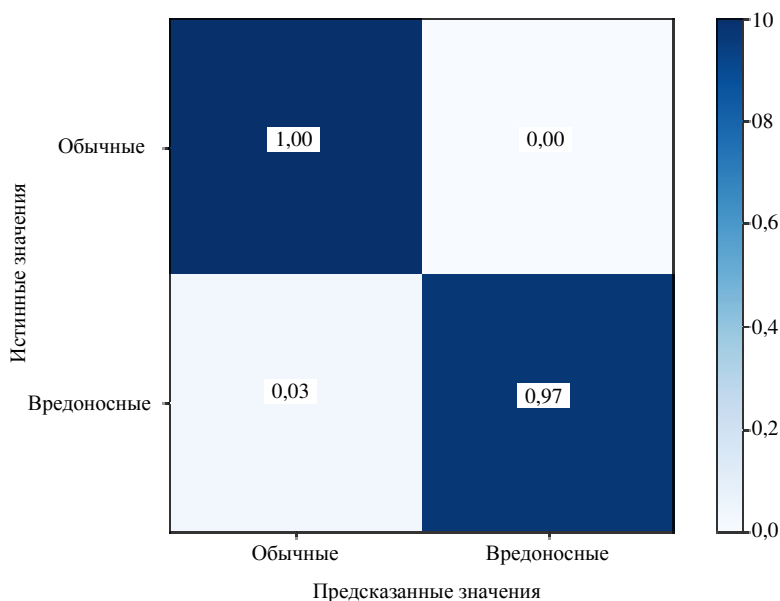


Рис. 7. Нормализованная матрица ошибок модели

При этом выбор признаков получился достаточно логичным:

1. Модель считает важным порт, используемый соединением (sport, dsport), который ассоциируется с конкретным приложением.

2. Модель считает, что UDP-соединения подозрительнее TCP-соединений.

3. Модель считает, что аномальное количество потерянных пакетов в соединении является подозрительным (sloss, dloss).

4. Аналогично этому модель считает подозрительным аномальное число переданных пакетов за соединение (spkts, dpkts), а также переданных байтов (sbytes, dbytes).

5. Модель считает подозрительными соединения, в которых аномальное количество пакетов с небольшим содержимым (smeansz, dmeansz).

Дальнейшая работа по совершенствованию и оценке разработанной модели предполагает ответы на следующие вопросы:

1. На каком основании модель оценивает соединения по ttl (sttl, dttl)?

2. На каком основании модель считает важным признак джиттера (разброс максимального/минимального времени прохождения пакета) для получателя, но не источника?

3. На каком основании модель считает важным начальный sequence number tcp-соединения (stcpb, dtcpb)?

Кроме этого, требуется проведение фильтрации части независимых переменных модели по результатам корреляционного анализа [19]. Вместо фильтрации лишних переменных рекомендуется использовать методы уменьшения размерности, например, метод главных компонент (principal component analysis, PCA) для замены нескольких коррелирующих переменных одной составной [20].

Таким образом, рост количества компьютерных атак на информационные системы, необходимость защиты объектов КИИ требуют поиска наиболее эффективных способов обнаружения атак. Разработанная модель, позволяет представить работу системы обнаружения вторжений, а также оценить эффективность ее функционирования.

Библиографический список

1. En-Najjary T., Urvoy-Keller. G. A first look at traffic classification in enterprise networks // Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. – ACM, 2010.

2. Обзор задач и методов их решения в области классификации сетевого трафика / А.И. Гетьман, Ю.В. Маркин, Е.Ф. Евстропов, Д.О. Обыденков // Труды ИСП РАН. – 2017. – Т. 29, вып. 3. – С. 117–150.

3. Система фильтрации интернет-трафика на основе методов data mining / В.В. Глазкова, В.А. Масляков, И.В. Машечкин, М.И. Петровский // Программные продукты и системы. – 2008. – № 2.

4. Шабуров А.С. О разработке модели обнаружения компьютерных атак на объекты критической информационной инфраструктуры // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 26. – С. 199–213.

5. Микова С.Ю. Оладько В.С. Модель системы обнаружения аномалий сетевого трафика // Информационные системы и технологии. – 2016. – № 97(5). – С. 115–121.

6. Браницкий А.А. Котенко И.В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак // Труды СПИИРАН. – 2016. – № 2(45). – С. 207–244.

7. Костин Д.В. Шелухин О.И. Сравнительный анализ алгоритмов машинного обучения для проведения классификации сетевого зашифрованного трафика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – № 9. – С. 46–52.

8. Moustaf N., Slay J. Creating novel features to anomaly network detection using DARPA-2009 data set // Proceedings of the 14th European Conference on Cyber Warfare and Security. – 2015. – P. 204.

9. Moustafa N. UNSW-NB15: A comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set)' // Military Communications and Information Systems Conference, MilCIS 2015. – Canberra, Australia, November 10–12, 2015. – P. 1–6.

10. Петров В.В., Богатырев Е.А. Статистический анализ сетевого трафика // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. студ. и аспирантов. – 2003. – Vol. 1.

11. Шелухин О.И., Симонян А.Г. Ванюшина А.В. Эффективность алгоритмов выделения атрибутов в задачах классификации приложений при интеллектуальном анализе трафика // Электросвязь. – 2016. – № 11. – С. 79–85.

12. Farah T., Trajkovic L. Anonym: A tool for anonymization of the Internet traffic // IEEE 2013 International Conference on Cybernetics (CYBCONF). – 2013. – P. 261–266.

13. Risso F., Degioanni L. An Architecture for High Performance Network Analysis // Proceedings of the 6th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2001). – Hammamet, Tunisia, July 2001.

14. Orebaugh Angela, Gilbert Ramirez, Jay Beale. Wireshark & Ethereal network protocol analyzer toolkit. – Elsevier, 2006.

15. Yanyan Zhang, Yao Yuan. Study of database intrusion detection based on improved association rule algorithm // Computer Science and Information Technology (ICCSIT). 3rd IEEE International Conference on. – IEEE 2010. – 2010. – Vol. 4. – P. 673–676.

16. Komer Brent, James Bergstra, Chris Eliasmith. Hyperopt-sklearn: automatic hyperparameter configuration for scikit-learn // ICML workshop on AutoML. – 2014.

17. Safavian S. Rasoul, David Landgrebe. A survey of decision tree classifier methodology // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. – 1991. – 21.3. – P. 660–674.

18. Nascimento Gustavo, Miguel Correia. Anomaly-based intrusion detection in software as a service // Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W). – 2011. – IEEE/IFIP 41st International Conference on. – IEEE, 2011.

19. Andrew Galen & Arora, Raman & Bilmes, Jeff & Livescu K. Deep Canonical Correlation Analysis // Proc. of the 30th Intl. Conference on Machine Learning. – 2013.

20. Tharwat Alaa. Principal component analysis – a tutorial // International Journal of Applied Pattern Recognition. – 2016. – Vol. 3. – P. 197–240. DOI: 10.1504/IJAPR.2016.079733

References

1. En-Najjary T., Urvoy-Keller. G. A first look at traffic classification in enterprise networks. *Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. ACM, 2010.

2. Get'man A.I., Markin Iu.V., Evstropov E.F., Obydenkov D.O. Obzor zadach i metodov ikh resheniia v oblasti klassifikatsii setevogo trafika [A survey of problems and solution methods in network traffic classification]. *Trudy Institut sistemnogo programmirovaniia Rossiiskoi akademii nauk*, 2017, vol. 29, iss. 3, pp. 117-150.

3. Glazkova V.V., Masliakov V.A., Mashechkin I.V., Petrovskii M.I. Sistema fil'tratsii internet-trafika na osnove metodov data mining [Internet traffic filtering system based on data mining approach]. *Programmnye produkty i sistemy*, 2008, no. 2.

4. Shaburov A.S. O razrabotke modeli obnaruzheniia komp'iuternykh atak na ob"ekty kriticheskoi informatsionnoi infrastruktury [On the development of a model for detecting computer attacks on objects of critical information infrastructure]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 26, pp. 199-213.

5. Mikova S.Iu. Olad'ko V.S. Model' sistemy obnaruzheniia anomalii setevogo trafika [Network traffic anomaly detection system model]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii*, 2016, no. 97(5), pp. 115-121.

6. Branitskii A.A. Kotenko I.V. Analiz i klassifikatsiia metodov obnaruzheniia setevykh atak [Analysis and classification of methods for network attack detection]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo instituta informatiki i avtomatizatsii Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, no. 2(45), pp. 207-244.

7. Kostin D.V. Shelukhin O.I. Sravnitel'nyi analiz algoritmov mashinogo obucheniia dlia provedeniia klassifikatsii setevogo zashifrovannogo trafika [Comparison of machine learning algorithms for encrypted traffic classification]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2016, no. 9, pp. 46-52.

8. Moustaf N., Slay J. Creating novel features to anomaly network detection using DARPA-2009 data set. *Proceedings of the 14th European Conference on Cyber Warfare and Security*, 2015, 204 p.

9. Moustafa N. UNSW-NB15: A comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). *Military Communications and Information Systems Conference, MilCIS 2015*. Canberra, Australia, November 10-12, 2015, pp. 1-6.

10. Petrov V.V., Bogatyrev E.A. Statisticheskii analiz setevogo trafika [Statistical analysis of network traffic]. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika. Tezisy dokladov X Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov*, 2003, vol. 1.

11. Shelukhin O.I., Simonian A.G. Vaniushina A.V. Effektivnost' algoritmov vydeleniia atributov v zadachakh klassifikatsii prilozhenii pri intellektual'nom analize trafika [Efficiency of attribute allocation algorithms in application classification problems in traffic mining]. *Elektrosviaz'*, 2016, no. 11, pp. 79-85.

12. Farah T., Trajkovic L. Anonym: A tool for anonymization of the Internet traffic. In *IEEE 2013 International Conference on Cybernetics (CYBCONF)*, 2013, pp. 261-266.

13. Risso F., Degioanni L. An Architecture for High Performance Network Analysis. *Proceedings of the 6th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2001)*. Hammamet, Tunisia, July 2001.

14. Orebaugh Angela, Gilbert Ramirez, Jay Beale. *Wireshark & Ethereal network protocol analyzer toolkit*. Elsevier, 2006.

15. Yanyan Zhang, Yao Yuan. Study of database intrusion detection based on improved association rule algorithm. *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010, 3rd IEEE International Conference on IEEE*, 2010, vol. 4, pp. 673-676.

16. Komer Brent, James Bergstra, Chris Eliasmith. Hyperopt-sklearn: automatic hyperparameter configuration for scikit-learn. *CML workshop on AutoML*, 2014.

17. Safavian S. Rasoul, David Landgrebe. A survey of decision tree classifier methodology. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 1991, 21.3, pp. 660-674.

18. Nascimento Gustavo, Miguel Correia. Anomaly-based intrusion detection in software as a service. *Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W), 2011, IEEE/IFIP 41st International Conference on. IEEE*, 2011.

19. Andrew Galen & Arora, Raman & Bilmes, Jeff & Livescu K. Deep Canonical Correlation Analysis. *Proc. of the 30th Intl. Conference on Machine Learning*, 2013.

20. Tharwat Alaa. Principal component analysis - a tutorial. *International Journal of Applied Pattern Recognition*, 2016, vol. 3, pp. 197-240. DOI: 10.1504/IJAPR.2016.079733

Сведения об авторах

Шабуров Андрей Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shans@at.pstu.ru).

Никитин Алексей Сергеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: siriousbiz@yandex.ru).

About the authors

Shaburov Andrey Sergeevich, (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shans@at.pstu.ru).

Nikitin Aleksey Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: siriousbiz@yandex.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 681.5.669.295

Ю.П. Кирин, В.А. ТихоновБерезниковский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Березники, Россия**РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ТЕТРАХЛОРИДА ТИТАНА МАГНИЕМ**

Рассмотрен робастный подход к управлению процессом восстановления титана, позволяющий интенсифицировать процесс за счет повышения температуры. Объектом управления является зона экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления титана, представленная объектом управления с интервально-неопределенными параметрами, заданное значение температуры которого поддерживается двухпозиционным регулятором. Определено технологическое ограничение значения максимальной температуры объекта управления. Получено описание объекта в виде интервальной динамической модели. С применением модели в классе двухпозиционных систем проведены анализ робастного качества и синтез робастного управления температурой объекта управления. Анализ робастного качества предусматривает определение наихудшего показателя качества работы двухпозиционной системы регулирования температуры при любых значениях параметров объекта из известных интервалов. Таким показателем является максимально возможная амплитуда положительного отклонения температуры, характеризующая в двухпозиционной системе величину превышения регулируемой температурой заданного значения. Синтез робастного управления температурой основан на концепции гарантируемого (минимаксного) управления, предполагающей достижение наилучшего результата при наихудших сочетаниях неопределенных факторов. Ее применение позволяет придать двухпозиционному регулятору робастные свойства для поддержания максимально допустимой температуры объекта управления, которые обеспечиваются использованием амплитуды положительного отклонения температуры в качестве гарантированного критерия оценки работы двухпозиционной системы. Задача синтеза робастного управления заключается в нахождении такого заданного значения двухпозиционному регулятору, которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры объекта при наличии в интервальной модели неопределенных факторов. В такой постановке задачи заданное значение двухпозиционного регулятора является гарантирующим управлением температурой объекта. В статье рассмотрен эволюционный путь решения проблемы интенсификации процесса восстановления, предусматривающий разработку на основе интервальной динамической модели и практическую реализацию предложенных методов робастного управления температурой на разных этапах автоматизации производства губчатого титана с применением машин централизованного контроля, управляющих вычислительных машин, микропроцессорных контроллеров и компьютеров. Робастное управление позволило повысить температуру и улучшить за счет этого технологические показатели процесса восстановления тетрахлорида титана магнием.

Ключевые слова: восстановление тетрахлорида титана магнием, двухпозиционное регулирование, интервальная модель, робастное управление, гарантирующее заданное значение температуры.

Yu.P. Kirin, V.A. Tikhonov

Berezniki branch of the Perm National Research Polytechnic University,
Berezniki, Russian Federation

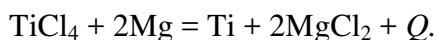
ROBUST CONTROL OF THE RECOVERY PROCESS OF TETRACHLORIDE TITANIUM MAGNESIUM

A robust approach to controlling the process of titanium reduction is considered, which makes it possible to intensify the process by increasing the temperature. The control object is the exothermic reaction zone of the industrial titanium recovery apparatus, represented by the control object with interval-indeterminate parameters, the set temperature value of which is maintained by the on-off regulator. The technological limitation of the value of the maximum temperature of the control object is determined. A description of the object in the form of an interval dynamic model is obtained. Using the model in the class of two-point systems, an analysis of robust quality and synthesis of robust control of the temperature of the control object was carried out. The analysis of robust quality provides the definition of the worst performance indicator of a two-position temperature control system for any values of object parameters from known intervals. Such an indicator is the maximum possible amplitude of the positive temperature deviation, characterizing in the two-position system the magnitude of the excess of the setpoint set by the temperature. Synthesis of robust temperature control is based on the concept of guaranteed (minimax) control, suggesting the achievement of the best result with the worst combinations of uncertain factors. Its application allows the on-off regulator to robust properties to maintain the maximum permissible temperature of the control object, which are provided by using the amplitude of the positive temperature deviation as a guaranteed criterion for estimating the operation of the two-position system. The task of synthesis of robust control is to find such a given value for a two-position controller that would guarantee the maintenance of the maximum permissible temperature of the object if there are undetermined factors in the interval model. In this formulation of the problem, the set value of the on-off regulator is the guaranteeing control of the temperature of the object. The article considers the evolutionary way of solving the problem of intensification of the restoration process, which involves the development, based on the interval dynamic model and practical implementation of the proposed methods of robust temperature control at different stages of automation of sponge titanium production with the use of centralized control machines, control computers, microprocessor controllers and computers. Robust control allowed to increase the temperature and improve the technological parameters of the process of reduction of titanium tetrachloride with magnesium.

Keywords: reduction of titanium tetrachloride by magnesium, on-off control, interval model, robust control, guaranteeing the set temperature

Введение. Основу промышленного магнийтермического производства губчатого титана составляют процессы восстановления тетрахлорида титана магнием и последующей вакуумной сепарации, осуществляемые в аппаратах периодического действия [1].

Восстановление тетрахлорида титана магнием – высокотемпературный экзотермический процесс, основанный на реакции химического превращения:



Процесс проводят в герметичном аппарате в атмосфере инертного газа. Магний загружают в аппарат перед началом процесса одной

порцией, тетрахлорид титана подают непрерывно в течение всего процесса. При магнетермическом восстановлении титана наряду с восстановителем – жидким магнием в аппарате содержатся титановая губка, образующая пористый блок, и побочный продукт реакции – хлорид магния, который имеет более высокую плотность, чем магний. Хлорид магния опускается в донную часть аппарата, откуда периодически удаляется через сливное отверстие. После восстановления в реакторе остается спекшийся блок реакционной массы в виде титановой губки, поры которой заполнены основными примесями – магнием и хлоридом магния. Последние имеют достаточно высокое давление паров и при нагревании в процессе сепарации под вакуумом испаряются, а затем отгоняются в конденсатор.

Конструкция промышленного аппарата восстановления предусматривает выделение в рабочем объеме на заданном уровне по высоте аппарата зону взаимодействия тетрахлорида титана с магнием – зону экзотермической реакции. При существующем аппаратурном оформлении процесса выделяемое тепло отводят направленным потоком воздуха, подаваемым в зону экзотермической реакции аппарата вентилятором. Температура зоны экзотермической реакции поддерживается на заданном уровне двухпозиционным регулятором включением и выключением вентилятора.

Основными направлениями совершенствования производства губчатого титана являются получение высококачественного однородного по химическому составу губчатого титана и повышение производительности процессов восстановления и вакуумной сепарации.

Один из путей реализации указанных направлений состоит в интенсификации процесса восстановления [2].

В результате экспериментальных и теоретических исследований определены условия интенсификации процесса восстановления и установлено влияние температуры и концентрации тетрахлорида титана на скорость реакции восстановления. Так, для одной и той же концентрации тетрахлорида титана, равной $0,85 \cdot 10^{-2}$ моль/л, значения константы скорости реакции восстановления составляют при 750, 850 и 950 °С соответственно 0,75, 2,24 и 7,48 л/(моль·с). Это обуславливает ускорение реакции с ростом температуры. Повышение концентрации тетрахлорида титана и связанное с ним повышение общего давления в реакторе восстановления также способствуют ускорению реакции восста-

новления: при изменении концентрации от $0,42 \cdot 10^{-2}$ до $3,4 \cdot 10^{-2}$ моль/л скорость реакции при 850°C возрастает с 90 до 478 кг/(м²·ч) [3]. В промышленной практике повышение концентрации тетрахлорида титана реализовано экспериментальным подбором подаваемого в аппарат максимально возможного расхода тетрахлорида с таким расчетом, чтобы при интенсифицированных режимах не ухудшалось качество получаемого губчатого титана [4].

Определено технологическое ограничение значения максимальной температуры для реакторов восстановления, выполненных из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. За верхний предел допустимой температуры процесса восстановления принимается 900°C , при превышении которой губчатый титан загрязняется примесями железа вследствие их перехода из материала стенки реактора через газовую фазу тетрахлорида титана [3].

В производственных условиях температурный режим процесса восстановления обеспечивался экспериментальным подбором задания многоканальному двухпозиционному регулятору температуры зоны экзотермической реакции. В первых работах по интенсификации процесса восстановления задание регулятору температуры зоны экзотермической реакции назначалось значительно ниже максимально допустимого значения – на уровне 800°C [5, 6].

В сложившейся ситуации задача интенсификации процесса восстановления состояла в разработке такого управления, которое позволяло бы поддерживать температуру зоны экзотермической реакции на максимально допустимом уровне. Ее решение осложнялось тем, что зона экзотермической реакции является объектом управления с неопределенными динамическими параметрами, которые в условиях производства губчатого титана изменяются в некоторых пределах [7].

Для эффективного управления такими объектами предложены методы анализа и синтеза робастного управления, позволяющие в классе двухпозиционных систем обеспечить гарантированное поддержание максимально допустимой температуры процессов восстановления и вакуумной сепарации губчатого титана при изменении неопределенных параметров объектов в заданных диапазонах. Практическая реализация методов продемонстрирована на примере робастного управления температурой эндотермического процесса – вакуумной сепарации губчатого титана. Объектом управления служила зона нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации [8].

В настоящей статье рассматривается применение данных методов для анализа и синтеза робастного управления температурой экзотермического процесса – восстановления тетрахлорида титана магнием. Объектом управления является зона экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления титана. Рассмотрен эволюционный путь решения проблемы интенсификации, предусматривающий разработку на основе интервальной динамической модели методов робастного управления температурой зоны экзотермической реакции промышленного аппарата восстановления и их практическую реализацию на разных этапах автоматизации производства губчатого титана с применением машин централизованного контроля, управляющих вычислительных машин, микропроцессорных контроллеров и компьютеров [2, 9, 10].

1. Модель динамики зоны экзотермической реакции. Рассмотрим модель динамики зоны экзотермической реакции (МДР) аппарата восстановления титана, построенную в системе многоканального двухпозиционного регулирования температуры [7].

Зона экзотермической реакции представлена нестационарным объектом управления (НОУ), описываемым дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами:

$$T_{0p}(t) \cdot \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}(t) \cdot \{x_p[t - \tau_p(t)] - z_p(t)\}, \quad (1)$$

где $y_p(t)$ – выходная величина (температура) НОУ; $x_p(t)$ – входная величина (мощность воздушного охлаждения) НОУ; $T_{0p}(t)$, $K_{0p}(t)$, $\tau_p(t)$ – постоянная времени, коэффициент усиления, время запаздывания НОУ соответственно; $z_p(t)$ – неконтролируемое возмущение (изменение тепла экзотермической реакции, выделяемого при взаимодействии тетрахлорида с магнием). Нестационарность объекта обусловлена тем, что названные коэффициенты являются неизвестными функциями времени и изменяются в некоторых пределах.

В представленной на рис. 1 схеме НОУ функционирует в режиме нормальной эксплуатации в замкнутом контуре многоканального двухпозиционного регулирования.

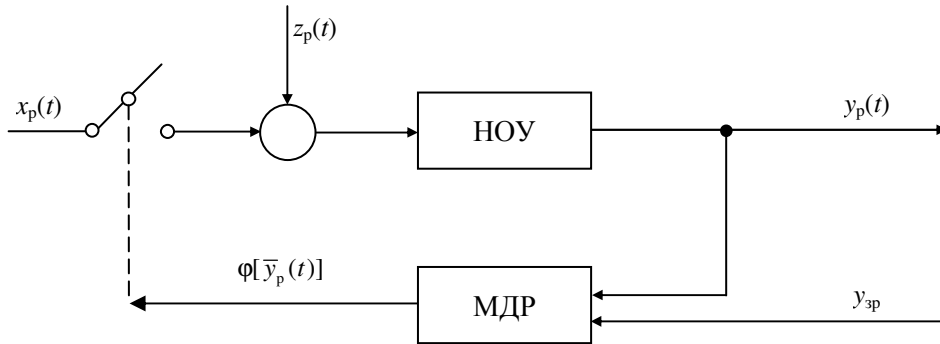


Рис. 1. Структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования температуры зоны экзотермической реакции аппарата восстановления титана

На входе НОУ действует возмущение $z_p(t)$. Включением и выключением входной величины $x_p(t)$ многоканальный двухпозиционный регулятор (МДР), функции которого выполняет машина централизованного контроля, поддерживает выходную величину $y_p(t)$ НОУ на заданном уровне y_{zp} в соответствии с алгоритмом:

$$\varphi[\bar{y}_p(t)] = \begin{cases} 0 & \text{при } \bar{y}_p(t) < y_{zp} - \Delta y_0 \text{ и} \\ y_{zp} - \Delta y_0 \leq \bar{y}_p(t) \leq y_{zp} + \Delta y_0, y'_p(t) > 0; \\ x_p(t) & \text{при } \bar{y}_p(t) > y_{zp} + \Delta y_0 \text{ и} \\ y_{zp} - \Delta y_0 \leq \bar{y}_p(t) \leq y_{zp} + \Delta y_0, y'_p(t) < 0; \end{cases}$$

$$\bar{y}_p(t) = y_p(\gamma T) \text{ при } \gamma T \leq t < (\gamma + 1)T, \quad \gamma = 1, 2, \dots$$

где $\bar{y}_p(t)$ – квантованная по времени выходная величина НОУ; $\varphi[\bar{y}_p(t)]$ – выходная величина МДР; $2\Delta y_0$ – зона нечувствительности МДР; $y'_p(t)$ – скорость изменения выходной величины; T – интервал квантования по времени.

Таким образом, двухпозиционное регулирование температуры осуществляется следующим образом: в позиции «включено» на входе НОУ действует разность $x_p(t) - z_p(t)$, в позиции «отключено» – возмущение $z_p(t)$. Двухпозиционная система при этом работает в режиме автоколебаний, параметры которых использованы для решения задачи

параметрической идентификации НОУ и определения значений коэффициентов $T_{0p}(t)$, $K_{0p}(t)$, $\tau_p(t)$, $z_p(t)$ уравнения (1).

2. Интервальная модель динамики объекта управления. Изложенное выше дает основание рассматривать НОУ как объект регулирования с интервально-неопределенными параметрами, а систему многоканального двухпозиционного регулирования температуры НОУ – как интервальную систему автоматического регулирования [11, 12].

Для исследования такой интервальной системы управления воспользуемся робастным подходом [13, 14], предусматривающим анализ робастного качества для определения наихудших показателей качества двухпозиционной системы при изменении интервальных параметров в заданном диапазоне, и разработку методов синтеза робастных регуляторов, обеспечивающих гарантированное по определенному критерию качество работы системы при любых значениях параметров объекта управления из известных интервалов. В общем случае качество работы системы оценивают по величине максимальной ошибки регулирования в наиболее неблагоприятных условиях функционирования системы. В нашем случае критерием качества работы двухпозиционной системы служит максимально возможная амплитуда положительного отклонения температуры НОУ от заданного значения, характеризующая величину превышения регулируемой температурой заданного значения [8]. Ее аналитическое выражение получено из уравнения (1) в предположении о квазистационарности НОУ на интервале идентификации (в течение периода автоколебаний температуры) [7]:

$$\Delta y_{(+p)} = K_{0p} \cdot z_p \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p} + \tau_{d.on}}{T_{0p}}\right) \right] + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p} + \tau_{d.on}}{T_{0p}}\right), \quad (2)$$

где $\Delta y_{(+p)}$ – амплитуда положительного отклонения температуры от y_{zp} ; $\tau_{on.p}$ – время запаздывания НОУ при включении $x_p(t)$; $\tau_{d.on}$ – дополнительное время запаздывания МДР при включении $x_p(t)$.

Для реализации робастного подхода получено описание НОУ в виде интервальной динамической модели, обеспечивающей анализ робастного качества и синтез гарантированного управления температурой НОУ. При этом предполагается, что неизвестные значения параметров объекта лежат внутри некоторого известного интервала [15].

В результате решения задачи параметрической идентификации получены интервальные значения динамических параметров НОУ:

$$T_{0p}^{\min} \leq T_{0p}(t) \leq T_{0p}^{\max}; \quad (3)$$

$$K_{0p}^{\min} \leq K_{0p}(t) \leq K_{0p}^{\max}; \quad (4)$$

$$\tau_p^{\min} \leq \tau_p(t) \leq \tau_p^{\max}. \quad (5)$$

Определены наиболее неблагоприятные (наихудшие) сочетания значений динамических параметров НОУ из диапазона (3)–(5), при которых в системе имеет место наибольшая ошибка регулирования температуры. Запишем уравнение (1) в следующем виде:

$$T_{0p}^{\min} \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}^{\max} [x_p(t - \tau_p^{\max}) - z_p(t)]. \quad (6)$$

Данное уравнение описывает динамику в наихудшем (с точки зрения наибольшей величины амплитуды положительного отклонения температуры) режиме функционирования НОУ. Аналогично можно записать уравнение, описывающее динамику НОУ для наилучшего (с точки зрения наименьшей величины амплитуды положительного отклонения температуры) режима функционирования НОУ:

$$T_{0p}^{\max} \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = K_{0p}^{\min} [x_p(t - \tau_p^{\min}) - z_p(t)]. \quad (7)$$

3. Анализ робастного качества регулирования температуры объекта управления. С помощью интервальной модели оценим наихудшее качество регулирования и определим возможный диапазон изменения амплитуды положительного отклонения температуры НОУ. При расчетах качества регулирования вносимое МДР дополнительное запаздывание принимают равным максимальной величине – интервалу квантования по времени T [16].

Тогда, используя соотношение (2), уравнения (6), (7), а также полагая $\tau_{d.on} = T$, запишем аналитические выражения для определения значений амплитуд положительного отклонения температуры в наихудшем $\Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p)$ и наилучшем $\Delta y_{(+p)}^{\text{нл}}(z_p)$ режимах функционирования НОУ [8]:

$$\Delta y_{(+p)}^{\text{нх}}(z_p) = K_{0p}^{\max} \cdot z_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + T}{T_{0p}^{\min}}\right) \right) + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + T}{T_{0p}^{\min}}\right), \quad (8)$$

$$\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p) = K_{0p}^{\min} \cdot z_p \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\min} + T}{T_{0p}^{\max}}\right) \right) + \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\min} + T}{T_{0p}^{\max}}\right). \quad (9)$$

Таким образом, амплитуды (8), (9) зависят от возмущающего воздействия НОУ.

На рис. 2 приведены графики изменения $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ и $\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$, построенные по соотношениям (8), (9) для интервальных значений НОУ: $T_{0p}^{\min} = 710$ с, $T_{0p}^{\max} = 780$ с, $K_{0p}^{\min} = 2,2$ °С/кВт, $K_{0p}^{\max} = 2,8$ °С/кВт, $\tau_{on.p}^{\min} = 23$ с, $\tau_{on.p}^{\max} = 30$ с. Известны диапазон изменения возмущения ($z_p^{\min} = 20$ кВт, $z_p^{\max} = 80$ кВт), а также параметры МДР температуры: $\Delta y_0 = 2$ °С, $T = 60$ с.

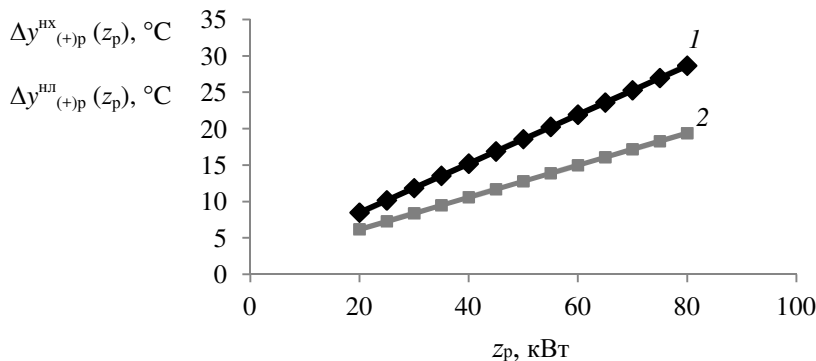


Рис. 2. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры НОУ в многоканальной двухпозиционной системе:

$$1 - \Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p); 2 - \Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$$

Диапазоны изменения $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$, $\Delta y_{(+p)}^{нл}(z_p)$ составляют соответственно 8,48 – 28,64 и 6,18–19,38 °С. Очевидно, что $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ является гарантирующей оценкой максимально возможного диапазона изменения амплитуды положительного отклонения температуры в том смысле, что при любом другом выборе динамических параметров НОУ диапазон изменения амплитуды будет не больше, чем $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$. Таким образом, амплитуда $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ характеризует наихудшее функционирование НОУ.

4. Синтез робастного управления температурой объекта. Во введении статьи отмечалось, что для интенсификации процесса восстановления необходимо температуру зоны экзотермической реакции поддерживать на максимально допустимом уровне. Для решения этой проблемы предложены методы синтеза робастного управления температурой, основанные на концепции гарантируемого (минимаксного) управления, предполагающей достижение наилучшего результата при наихудших сочетаниях неопределенных факторов [17, 18]. Ее применение позволяет придать МДР робастные свойства для поддержания максимально допустимой температуры НОУ, которые обеспечиваются использованием $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ в качестве гарантированного критерия оценки работы многоканальной двухпозиционной системы. Задача синтеза робастного управления заключается в данном случае в нахождении такого заданного значения МДР, которое гарантировало бы поддержание максимально допустимой температуры НОУ при наличии в интервальной модели неопределенных факторов. В такой постановке задачи заданное значение МДР рассматривается в качестве гарантирующего управления температурным режимом НОУ [8].

Как уже отмечалось во введении, для решения этой задачи использован эволюционный подход к разработке и внедрению робастного управления температурой процесса восстановления с учетом сложившейся практики создания систем автоматизации производства губчатого титана. Эффективность робастного управления при этом оценивалась величиной гарантирующего заданного значения температуры МДР, которая в значительной степени определялась возможностями применяемых для автоматизации технических и программных средств.

Ниже рассмотрены методы синтеза робастного управления, обеспечивающего интенсификацию процесса восстановления за счет повышения гарантирующего заданного значения температуры МДР на разных этапах автоматизации производства губчатого титана.

4.1. Гарантирующее управление температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе регулирования. Первые исследования робастного управления проведены в многоканальной двухпозиционной системе регулирования температуры ОНОУ, реализованной на основе машины централизованного контроля [9] (см. п.1). На этом этапе автоматизации задача состояла в определении гарантирующего заданного значения температуры МДР в условиях, когда возмущение $z_p(t)$ недоступно для измерения, известен диапазон изменения возмущения.

Для ведения в оптимальных режимах процесса восстановления требуется предварительное определение максимального заданного значения температуры, которое назначают в МДР перед началом процесса и сохраняют неизменным в течение всего процесса. Запишем для этого случая условие поддержания максимально допустимой температуры (y_d) НОУ в виде $y_{зр} + \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p) = y_d$ и определим заданное значение температуры [8]:

$$y_{зр} = y_d - \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p). \quad (10)$$

Это значение определяется величиной $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$, которая, в свою очередь, зависит от возмущающего воздействия. При выборе заданного значения необходимо учитывать наибольшую величину $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$ в известном диапазоне изменения возмущения. В приведенном выше примере она составляет 28,64 °С при $z_p^{\text{max}} = 80$ кВт. В этом случае (10) может быть записано в следующем виде:

$$y_{зр} = y_d - \Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p^{\text{max}}). \quad (11)$$

Выполнение соотношения (11) означает, что регулируемая температура не превысит установленного ограничения. Следовательно, рассчитанное по этому соотношению $y_{зр}$ можно рассматривать в качестве гарантирующего управления температурой НОУ. При $y_d = 900$ °С гарантирующее заданное значение МДР составляет 871,36 °С.

4.2. Гарантирующее управление температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим регулятором. Дальнейшее повышение гарантирующего заданного значения температуры МДР осуществлено за счет разработки методов управления, минимизирующих величину $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$. Критерий качества управления J представлен в следующем виде [8]:

$$J = \max [\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)] \rightarrow \min. \quad (12)$$

Величина $\Delta y_{(+)\text{p}}^{\text{нх}}(z_p)$ в значительной степени зависит от интервала квантования по времени T , который, как видно из приведенного выше примера, в два раза превышает время запаздывания НОУ. Интервал квантования равен времени обегания коммутатором датчиков температуры НОУ.

Рассмотрим управление НОУ, удовлетворяющее требованию (12), основанное на повышении быстродействия МДР температуры. В данном случае, как и в предыдущем, предполагается, что известен диапазон изменения возмущения.

Решение задачи повышения быстродействия основано на сокращении времени связи каналов с измерительной схемой МДР, которое задается коммутатором [19]. В металлургическом цехе одновременно функционируют несколько десятков аппаратов восстановления титана. Каждый канал МДР обслуживает один НОУ. В процессе обегания датчиков в каждом НОУ анализируют результаты измерений температуры, полученные в текущем и предыдущем интервалах квантования. При совпадении результатов измерений коммутатор соответствующего канала переключается с сокращенным временем связи, в противном случае устанавливается фиксированное (заданное) время связи. Следовательно, интервал квантования будет переменной величиной. Такие системы относятся к классу систем управления со случайным периодом квантования [20].

Для практической реализации быстродействующего МДР разработаны устройство обработки измерительной информации и управления переключением коммутатора, а также коммутатор, позволяющий изменять скорость переключения каналов. Это позволило сократить интервал квантования с 60 до 22–30 с [19, 21].

$$\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p), \text{ } ^\circ\text{C}$$

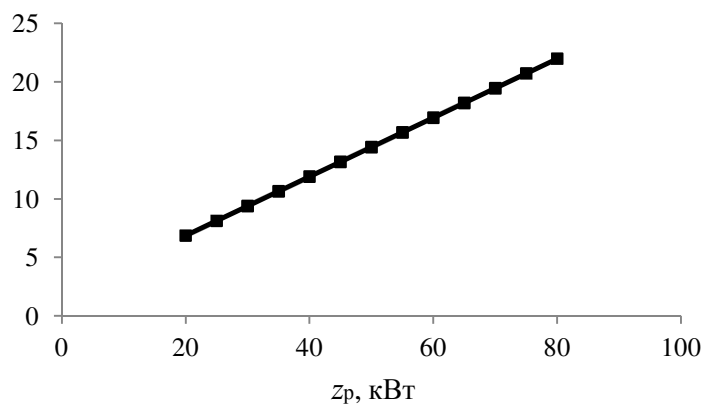


Рис. 3. Изменение амплитуды положительного отклонения температуры НОУ в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим МДР

Как и в предыдущем случае, определено гарантирующее управление температурой НОУ с применением быстродействующего МДР. Для этого в (8) вместо $T = 60$ с подставлено значение $\bar{T} = 30$ с. Величина $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p^{\max})$ в данном случае снижается до $21,98$ °С (рис. 3). Соответственно повышается гарантирующее заданное значение температуры МДР, которое согласно (11) составляет $878,02$ °С.

4.3. Алгоритм изменения гарантирующего управления температурой объекта в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующими регуляторами. Новые возможности совершенствования робастного управления температурным режимом НОУ связаны с применением управляющих вычислительных машин и компьютеров для измерения возмущений в системах автоматизации производства губчатого титана [2, 10].

Подставим в (10) значение $\Delta y_{(+p)}^{hx}(z_p)$ из (8) и преобразуем полученное выражение к следующему виду:

$$y_{zp} = K - L \cdot z_p, \quad (13)$$

где K, L – постоянные коэффициенты, °С и °С/кВт соответственно:

$$K = y_d - \Delta y_0 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{on.p}^{\max} + \bar{T}}{T_{0p}^{\min}}\right),$$

$$L = K_{0p}^{\max} \cdot \exp\left(1 - \frac{\tau_{on.p}^{\max} + \bar{T}}{T_{0p}^{\min}}\right).$$

Из (13) следует, что поддержание гарантирующего заданного значения температуры сводится к измерению возмущения и изменению заданного значения МДР по результатам измерений. В условиях промышленного производства губчатого титана измерение возмущения НОУ осуществляют прямым или косвенным методами [8].

По сравнению с предыдущим случаем данный алгоритм позволяет поддерживать более высокое заданное значение температуры НОУ в диапазоне $878,02$ – $893,14$ °С. Еще более высокое заданное значение температуры в диапазоне $886,9$ – $895,3$ °С получено в результате применения в качестве МДР быстродействующего микропроцессорного контроллера, для которого в (13) можно принять $\bar{T} = 0$ (рис. 4).

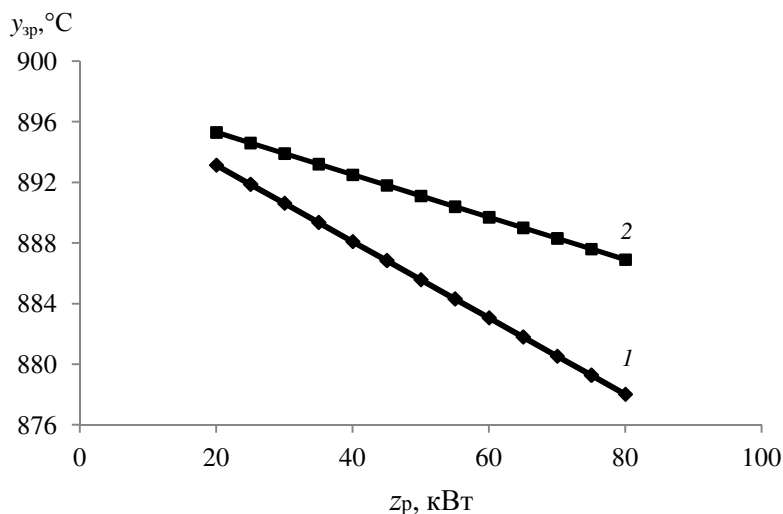


Рис. 4. Изменение гарантирующего заданного значения температуры НОУ в зависимости от возмущения в многоканальной двухпозиционной системе с быстродействующим МДР (1) и с микропроцессорным контроллером в качестве МДР (2)

Выводы. Рассмотренные методы анализа и синтеза робастного управления нашли практическое применение на разных этапах автоматизации производства губчатого титана и позволили в конечном итоге на 5–7 % повысить температурный режим зоны экзотермической реакции аппарата восстановления титана. Это дало возможность интенсифицировать процесс восстановления и улучшить его технологические показатели [2, 22]: повысилась производительность процесса, улучшилось качество губчатого титана, снизились энергозатраты.

Библиографический список

1. Родякин В.В., Гегер В.Э., Скрыпнюк В.М. Магниетермическое производство губчатого титана. – М.: Metallurgy, 1971. – 216 с.
2. Современные направления совершенствования и развития производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, Н.В. Бильфельд // Титан. – 2003. – № 2(13). – С. 11–16.
3. Тарасов А.В. Metallurgy титана. – М.: Академкнига, 2003. – 328 с.
4. Интенсификация технологического режима процесса восстановления в аппарате производительностью 4,5–5 т губчатого титана за цикл / А.Б. Танкеев, Д.А. Рымкевич, О.А. Путина [и др.] // Титан. – 2007. – № 1. – С. 3–8.

5. Петров В.И., Соколон И.И., Мальшин В.М. Разработка технологии и аппаратов повышенной производительности для получения титановой губки // Сб. трудов ВАМИ. – Л., 1963. – № 50. – С. 157–166.
6. Разработка стандартного процесса получения титановой губки / В.И. Петров, Р.Г. Локшин, В.М. Мальшин [и др.] // Журнал прикладной химии. – 1965. – Т. 38. – Вып. 6. – С. 1217–1224.
7. Идентификация технологических процессов производства губчатого титана / Ю.П. Кирин, А.В. Затонский, В.Ф. Беккер, С.Л. Краев // Проблемы управления. – 2008. – № 4. – С. 71–77.
8. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Робастное управление технологическими процессами производства губчатого титана // Проблемы управления. – 2016. – № 6. – С. 71–79.
9. Лидерман В.И., Кирин Ю.П. Опыт внедрения и эксплуатации автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами в производстве титана // Цветная металлургия. – 1976. – № 17. – С. 56–58.
10. Скорик В.Ф., Бирюков В.Б., Дегтярик Н.В. и др. Автоматизированная система управления процессом производства губчатого титана «Титан» // Цветная металлургия. – 1984. – № 1. – С. 41–45.
11. Неймарк Ю.И. Робастная устойчивость линейных систем // Докл. АН СССР. – 1991. – Т. 319, № 3. – С. 578–580.
12. Гусев Ю.М., Ефанов В.Н., Крымский В.Г. Анализ и синтез линейных интервальных динамических систем (состояние проблемы) // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1991. – № 1. – С. 3–23.
13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems // IEEE Trans. On Autom. Control. – 1980. – Vol. 25, № 6. – P. 1058–1072.
14. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems // Computers and Chemical Engineering. – 1997. – Vol. 2. – P. 707–721.
15. Кирин Ю.П., Кирьянов В.В. Построение интервальной модели динамики процессов производства губчатого титана // Вестник Череповец. гос. ун-та. – 2016. – № 2. – С. 7–10.
16. Черепанов А.И. Динамика систем многоканального позиционного регулирования. – М.: Энергия, 1970. – 80 с.
17. Афанасьев В.Н. Концепция гарантированного управления неопределенными объектами // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2010. – № 1. – С. 16–23.

18. Небылов А.В. Гарантирование точности управления. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
19. А.с. 746436 СССР. Устройство для контроля и регулирования параметров / Ю.П. Кирин; опубл. 1980. Бюл. № 25. – С. 91.
20. Артемьев В.М., Ивановский А.В. Дискретные системы управления со случайным периодом квантования. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 96 с.
21. Кирин Ю.П. Бесконтактный коммутатор для машин централизованного контроля // Цветная металлургия. – 1977.– № 14. – С. 44–47.
22. Кирин Ю.П., Беккер В.Ф., Затонский А.В. Некоторые результаты совершенствования процесса получения губчатого титана // Цветные металлы. – 2009. – № 12. – С. 91–94.

References

1. Rodiakin V.V., Geger V.E., Skrypniuk V.M. Magnietermicheskoe proizvodstvo gubchatogo titana [Magnesium thermal production of titanium sponge]. Moscow: Metallurgii, 1971. 216 p.
2. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Bil'fel'd N.V. Sovremennye napravleniia sovershenstvovaniia i razvitiia proizvodstva gubchatogo titana [Modern directions of improvement and development of titanium sponge production]. *Titan*, 2003, no. 2(13), pp. 11-16.
3. Tarasov A.V. Metallurgii titana [Metallurgy of titanium]. Moscow: Akademkniga, 2003, 328 p.
4. Tankeev A.B., Rymkevich D.A., Putina O.A. et al. Intensifikatsiia tekhnologicheskogo rezhima protsessa vosstanovleniia v apparate proizvoditel'nost'iu 4,5-5 tonn gubchatogo titana za tsikl [Intensification of the technological mode of the recovery process in the apparatus with a capacity of 4.5–5 tons of spongy titanium per cycle]. *Titan*, 2007, no. 1, pp. 3-8.
5. Petrov V.I., Sokolon I.I., Mal'shin V.M. Razrabotka tekhnologii i apparatov povyshennoi proizvoditel'nosti dlia polucheniia titanovoi gubki [Development of technology and high-performance apparatuses for titanium sponge production]. *Sbornik trudov VAMI*. Leningrad, 1963, no. 50, pp. 157-166.
6. Petrov V.I., Lokshin R.G., Mal'shin V.M. et al. Razrabotka standartnogo protsessa polucheniia titanovoi gubki [Development of a standard process for obtaining titanium sponge]. *Zhurnal prikladnoi khimii*, 1965, vol. 38, iss. 6, pp. 1217-1224.
7. Kirin Iu.P., Zatonskii A.V., Bekker V.F., Kraev S.L. Identifikatsiia tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Identification

of technological processes for the production of spongy titanium]. *Problemy upravleniia*, 2008, no. 4, pp. 71-77.

8. Kirin Iu.P., Kir'ianov V.V. Robastnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva gubchatogo titana [Robust control of technological processes for the production of sponge titanium]. *Problemy upravleniia*, 2016, no. 6, pp. 71-79.

9. Liderman V.I., Kirin Iu.P. Opyt vnedreniia i ekspluatatsii avtomatizirovannykh sistem kontroliia i upravleniia tekhnologicheskimi protsessami v proizvodstve titana [Experience of implementation and operation of automated systems for monitoring and control of technological processes in the production of titanium]. *Tsvetnaia metallurgiiia*, 1976, no. 17, pp. 56-58.

10. Skorik V.F., Biriukov V.B., Degtiarik N.V. et al. Avtomatizirovannaia sistema upravleniia protsessom proizvodstva gubchatogo titana "Titan" [Automated control system of titanium sponge titanium production process]. *Tsvetnaia metallurgiiia*, 1984, no. 1, pp. 41-45.

11. Neimark Iu.I. Robastnaia ustoichivost' lineinykh sistem [Robust stability of linear systems]. *Doklad AN SSSR*, 1991, vol. 319, no. 3, pp. 578-580.

12. Gusev Iu.M., Efanov V.N., Krymskii V.G. Analiz i sintez lineinykh interval'nykh dinamicheskikh sistem (sostoianie problemy) [Analysis and synthesis of linear interval dynamic systems (state of the problem)]. *Izvestiia AN SSSR. Tekhnicheskaiia kibernetika*, 1991, no. 1, pp. 3-23.

13. Ackermann J. Parameter space design of robust control systems. *IEEE Trans. On Autom. Control*, 1980, vol. 25, no 6, pp. 1058-1072.

14. Chen C.T., Wang M.D. Robust controller design for interval process systems. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, vol. 2, pp. 707-721.

15. Kirin Iu.P., Kir'ianov V.V. Postroenie interval'noi modeli dinamiki protsessov proizvodstva gubchatogo titana [Building an interval model of the dynamics of titanium sponge production processes]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 2, pp. 7-10.

16. Cherepanov A.I. Dinamika sistem mnogokanal'nogo pozitsionnogo regulirovaniia [Dynamics of multichannel position control systems]. Moscow: Energiia, 1970. 80 p.

17. Afanas'ev V.N. Kontseptsiiia garantirovannogo upravleniia neopredelennymi ob"ektami [The concept of guaranteed management of uncertain objects]. *Izvestiia Rossiiskoi akademii nauk. Teoriia i sistemy upravleniia*, 2010, no. 1, pp. 16-23.

18. Nebylov A.V. Garantirovanie tochnosti upravleniia [Guaranteeing Accuracy of Control]. Moscow: Nauka, 1998. 304 p.

19. Kirin Iu.P. Ustroistvo dlia kontroliia i regulirovaniia parametrov [Device for control and regulation of parameters]. Avtorskoe svidetel'stvo 746436 SSSR no. 25 (1980).

20. Artem'ev V.M., Ivanovskii A.V. Diskretnye sistemy upravleniia so sluchainym periodom kvantovaniia [Discrete control systems with a random quantization period]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 96 p.

21. Kirin Iu.P. Beskontaknyi kommutator dlia mashin tsentralizovannogo kontroliia [Contactless switch for centralized control machines]. *Tsvetnaia metallurgii*, 1977, no. 14, pp. 44-47.

22. Kirin Iu.P., Bekker V.F., Zatonskii A.V. Nekotorye rezul'taty sovershenstvovaniia protsessa polucheniia gubchatogo titana [Some results of improving the process of obtaining titanium sponge]. *Tsvetnye metally*, 2009, no. 12, pp. 91-94.

Сведения об авторах

Кири́н Ю́рий Петро́вич (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, Тельмана, 7, e-mail: klu2010@mail.ru).

Тихоно́в Вячесла́в Алекса́ндрович (Березники, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая технология и экология» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (618404, Березники, Тельмана, 7, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

About the authors

Kirin Yuri Petrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telmana, e-mail: klu2010@mail.ru).

Tikhonov Vyacheslav Aleksandrovich (Berezniki, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology and Ecology of Berezniki Branch of Perm National Research Polytechnic University (618404, Berezniki, 7, Telmana, e-mail: vtihonov@bf.pstu.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 681.32

С.Ф. Тюрин^{1,2}, М.А. Чудинов^{1,3}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, Россия

³ПАО «Морион», Пермь, Россия

FPGA LUT С ДВУМЯ ВЫХОДАМИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ПО ШЕННОНУ

В настоящее время количество логических элементов, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) типа FPGA (field-programmable gate array) достигает нескольких миллионов, что создает совершенно новые возможности при синтезе цифровой аппаратуры. При этом основой так называемых адаптивных логических модулей (АЛМ) FPGA являются деревья передающих транзисторов LUT (Look Up Table), вычисляющие логические функции в совершенной дизъюнктивной нормальной форме (СДНФ). При работе в арифметическом режиме вычисляются логические функции, отличающиеся значением одной переменной, например, переноса из разряда в разряд, что позволяет ускорить реализацию многоразрядной суммы. Для этого берут два LUT, выходы которых мультиплексируются по значению этой переменной, т.е. как бы вычисляют логические функции «впрок». Похожий принцип использован в архитектуре «Гиперфлекс» (HyperFlex), где разложение логической функции по Шеннону в цепи обратной связи позволяет обеспечить повышение быстродействия автомата с памятью. При этом используются две копии логической функции управления триггером, выбор которых также производится мультиплексором 2-1. Несмотря на отсутствие дефицита логических элементов в некоторых приложениях, например в отказоустойчивой аппаратуре, эти своего рода дублирующие элементы могли бы быть полезны, например, при построении резервированных структур. Поэтому предлагается реализовать декомпозицию по Шеннону на основе одного LUT, для чего дублируются только самые последние два транзистора соответствующего дерева с выходным инвертором, поскольку вычисляется та же самая логическая функция, но на наборе аргументов, отличающемся только одной переменной. В статье описывается предлагаемое техническое решение и оценивается выигрыш в количестве транзисторов по отношению к известному решению.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, LUT, разложение Шеннона.

S.F. Tyurin^{1,2}, M.A. Chudinov^{1,3}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation
Morion PJSC, Perm, Russian Federation

FPGA LUT WITH TWO SHANNON DECOMPOZITION OUTPUTS

At present, the number of logic elements, programmable logic integrated circuits of the FPGA (field-programmable gate array) type reaches several million, which creates completely new possibilities in the design of digital equipment. In this case, the basis of the so-called adaptive logic modules (ALMs) FPGA are the trees of transistors LUT (Look Up Table), which calculate logical functions in full disjunctive normal form (FDNF). When working in arithmetic mode, logical functions are calculated that differ in the value of one variable, for example, carry from discharge to discharge, which allows to speed up the implementation of a multi-digit adder. To do this, take two LUTs, whose outputs are multiplexed by the value of this variable, that is, how to calculate the logical functions "for future use". A similar principle is used in the HyperFlex architecture, where the Shannon decomposition (or Boolean factorization) of the logic function in the feedback loop allows for an increase in the speed of the state machine. Two copies of the flip-flop logic function are used, which are also selected by the 2-1 multiplexer. Despite the lack of shortage of logical elements in some applications, for example, in fault-tolerant equipment, these kind of duplicating elements could be useful, for example, when building redundant structures. Therefore, it is proposed to implement the Shannon decomposition on the basis of one LUT for which only the last two transistors of the corresponding tree with the output inverter are duplicated, since the same logical function is calculated, but on a set of arguments that differ only in one variable. The article describes the proposed technical solution and estimates the gain in the number of transistors in relation to the known solution.

Keywords: FPGA, LUT, Shannon decomposition or Boolean factorization.

Введение. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) являются одним из самых востребованных сегментов рынка элементной базы цифровой аппаратуры, выпускаемой с середины 80-х гг. XX в. [1–3]. К ПЛИС в настоящее время относят также и микросхемы систем на кристалле SoC (System-on-a-Chip) [4] и так называемые системы в пакете-SiP (System-in-Package), представляющие собой объёмные сборки разных микросхем [5, 6]. Имеются многочисленные модификации ПЛИС, но их делят на два основных класса: FPGA (field-programmable gate array), в которых логические функции реализуются в СДНФ (совершенной дизъюнктивной нормальной форме) в генераторах функций, представляющих собой дерево транзисторов (LUT-Look Up Table), CPLD (complex programmable logic devices), в которых вычисляются системы логических функций в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) [7–11]. Так, на сайте фирмы «Интел» [12] указаны следующие продукты: Stratix10 (14 нм), Stratix V (28 нм), Arria 10 (20 нм), Arria V (28 нм), Cyclone10 (20 нм), Cyclone V (28 нм), MAX10 (55 нм), причём MAX 10 одновременно числится и по разряду

CPLDs (complex programmable logic devices), в который входят также и MAX V (возможно 90 нм), MAX II (скорее всего 0,15 мкм). По классу SoC проходят ПЛИС Stratix10, Arria 10, Arria V, Cyclone 10, Cyclone V. На сайте другой крупнейшей фирмы производителя ПЛИС—Xilinx [13] представлены микросхемы ПЛИС Spartan-6 (45 нм), Virtex-7, Kintex-7, Artix-7, Spartan-7 (28 нм), Virtex UltraScale, Kintex UltraScale (20 нм), Virtex UltraScale+, Kintex UltraScale+ (16 нм). Имеются так называемые адаптивные логические модули АЛМ [14], оптимально конфигурируемые под требуемое число переменных. Всё начиналось с реализации логических функций до 4 переменных, в АЛМ возможна реализация любых функций 7 переменных и некоторых функций 8 переменных. Использование технологии tri-gate [15–17] позволило достичь нового уровня быстродействия или энергоэффективности. Изобилие ресурсов привело к созданию резервированных структур ПЛИС [18]. В связи с этим вызывает интерес вопрос ускорения вычислений логических функций и автоматных отображений за счёт так называемой декомпозиции по Шеннону [19]. Дело в том, что наличие уже десятков миллионов логических элементов дает возможность комбинационной реализации многих алгоритмов, реализуемых ранее только последовательными автоматами. Рассмотрим особенности такой декомпозиции, применяемой в настоящее время, и предложим подход к её дальнейшему развитию.

1. Декомпозиция при выполнении арифметических операций.

Дизъюнктивное разложение Шеннона (булева факторизация) по некоторой i -й переменной [20] позволяет разложить логическую (булеву) функцию f на две подфункции в виде дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ), в одной из которых i -я переменная равна 0, а в другой – 1. Пусть эта переменная x , которая может быть в выражении f как без инверсии, так и с инверсией, так же, как и другие переменные y, z, \dots, w , тогда разложение Шеннона по x имеет вид:

$$f[(x, \bar{x}), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}] = x \cdot f[(1, 0), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}] \vee \bar{x} \cdot f[(0, 1), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}]. \quad (1)$$

Конъюнктивное разложение Шеннона (используется конъюнктивная нормальная форма (КНФ)) по x имеет вид:

$$f[(x, \bar{x}), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}] = \{x \vee f[(0, 1), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}]\} \{ \bar{x} \vee f[(1, 0), \tilde{y}, \tilde{z}, \dots, \tilde{w}] \}. \quad (2)$$

Разложение Шеннона функций небольшого числа переменных удобно выполнять по таблице истинности. Например, проанализируем функции полного однобитного сумматора (рис. 1).

Функция суммы $\text{Sum}(C_{in}AB)$ при $C_{in} = 0$ (верхняя часть таблицы) становится суммой по модулю два $\text{Sum}(C_{in} = 0, AB) = A \oplus B$, а при $C_{in} = 1$ (нижняя часть таблицы) – эквивалентией $\text{Sum}(C_{in} = 1, AB) = A \leftrightarrow B$. Функция переноса $C_{out}(C_{in}AB)$ при $C_{in} = 0$ – это конъюнкция $C_{out}(C_{in}AB) = AB$, а при $C_{in} = 1$ – дизъюнкция $C_{out}(C_{in}AB) = A \vee B$. Таким образом, при изменении данных (Date 1 = A, Date 2 = B) подфункции вычисляются без учёта переноса, который используется для выбора одной из двух подфункций.

Логический элемент ПЛИС содержит генераторы функций LUT-2 (Look Up Table) и мультиплексы 2-1 (рис. 2).

Carry-in	Date 1 A	Date 2 B	BC	Carry-Out (CinAB)	Sum (CinAB)
0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1
0	1	0	2	0	1
0	1	1	3	1	0
1	0	0	4	0	1
1	0	1	5	1	0
1	1	0	6	1	0
1	1	1	7	1	1

Рис. 1. Дизъюнктивное разложение Шеннона функций полного сумматора

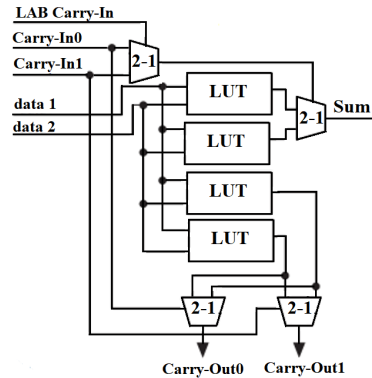


Рис. 2. Использование декомпозиции в логическом элементе при динамическом арифметическом режиме (LEin Dynamic Arithmetic Mode)

Мультиплексы на основе передающих транзисторов (Pass Transistors) 2-1, по существу, представляют собой LUT-1 на одну переменную без настройки входов данных. Следовательно, фактически происходит одновременная реализация двух подфункций суммы и двух подфункций переноса, зависящих от Date 1(A), Date 2 (B), которые затем выбираются старшей переменной Carry-In 0, Carry-In 1.

2. Декомпозиция при реализации последовательного автомата. При реализации последовательного автомата (автомата с памятью) для увеличения максимальной частоты реализации

автоматных отображений за счет разложения Шеннона «укорачивается» петля обратной связи [19]. На рис. 3 показана «длинная» обратная связь, реализующая некоторую функцию переходов:

$$y(t+1) = d(t) = ABCy_1. \quad (3)$$

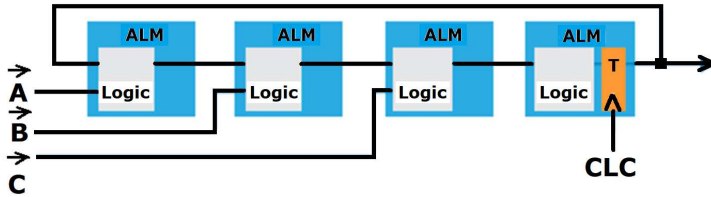


Рис. 3. «Длинная» обратная связь

A, B, C – это векторы входных переменных соответствующего автомата. Здесь указан синхронный триггер (T, flip-flop) на выходе реконфигурируемого LUT, входящего в состав так называемого адаптивного логического модуля ALM. Частота синхронизации CLC рассчитывается с учетом задержки в петле обратной связи на трёх последовательных ALM и логике четвертого ALM, поэтому суммарная задержка относительно велика, и она включает задержку в элементах маршрутизации. Эта обратная связь «длинная», потому что проходит через матрицу локальных связей, где возможны значительные задержки сигналов. Одна переменная A, B или C для ALM, реализующего функции 4 и даже в ряде случаев 7 и 8 переменных, – не показательный случай, поэтому пусть это будут некие векторы:

$$y(t+1) = d(t) = \overline{\overline{\overline{ABC}}}y_1, \quad (4)$$

например,

$$A = a_1a_2a_3; B = b_1b_2b_3; C = c_1c_2c_3. \quad (5)$$

Допустим, имеем такую функцию переходов:

$$y_1(t+1) = d(t) = [a_1a_2a_3\overline{y_1}(t) \vee \overline{a_1}\overline{a_2}\overline{a_3}y_1(t)] \vee b_1b_2b_3 \vee c_1c_2c_3. \quad (6)$$

Выполняем разложение Шеннона (Shannon decomposition or Boolean factorization), получаем:

$$y_1 = 0: a_1a_2a_3 \vee b_1b_2b_3 \vee c_1c_2c_3. \quad (7)$$

$$y_1 = 1: \overline{a_1}\overline{a_2}\overline{a_3} \vee b_1b_2b_3 \vee c_1c_2c_3. \quad (8)$$

На рис. 4 показана реализация двух этих функций в разных LUT ALM. При этом число переменных уменьшено на одну за счет исключения переменной состояния триггера y .

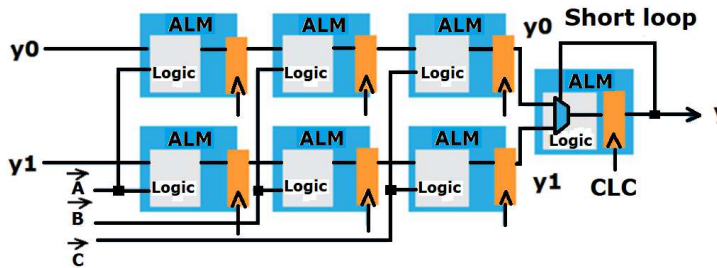


Рис. 4. «Короткая» обратная связь при введении разложения Шеннона

Поэтому петля обратной связи короткая, и задержка определяется только задержкой логики последнего ALM. Такой подход увеличивает аппаратные затраты, но они несущественны для ПЛИС, имеющей уже десятки миллионов таких логических элементов, здесь главное – скорость. Все это называется гипероптимизацией. Поиск возможностей такой оптимизации осуществляется гиперретаймингом. Дальнейшее продвижение этого направления может привести к тому, что такое разложение будет выполнено по всем переменным.

3. Логический элемент, реализующий декомпозицию по старшей переменной. Развитие направления декомпозиции по Шеннону может привести к тому, что задержка на вычисление логических функций будет сведена к минимуму, который определяется выбором одной из $2^n = i$ конституент всего одним транзистором однорангового дерева. В этом случае целесообразно использовать вектор входного набора в унитарном коде:

$$0000\dots 0x^i 0\dots 000000. \quad (9)$$

В выражении (9) позиция $x^i = 1$ в одном из 2^n разрядов определяет входной вектор функции (рис. 5).

Для уменьшения затрат на реализацию таких «декомпозированных» функций большого числа переменных предлагается использовать модифицированный унитарный код, включающий несколько бит, например три:

$$0000\dots x^i_3 x^i_2 x^i_1 000000. \quad (10)$$

Тогда, например, $x_3 = 1$ определяет группу из двух переменных $x_2 x_1$, которые уже подлежат дешифрации (рис. 6).

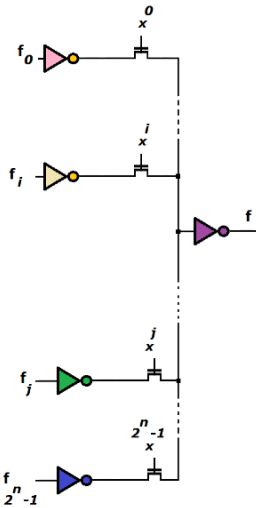


Рис. 5. Выбор одного из 2^n значений функции f унитарным кодом входного вектора $0000\dots 0x^i 0\dots 000000$

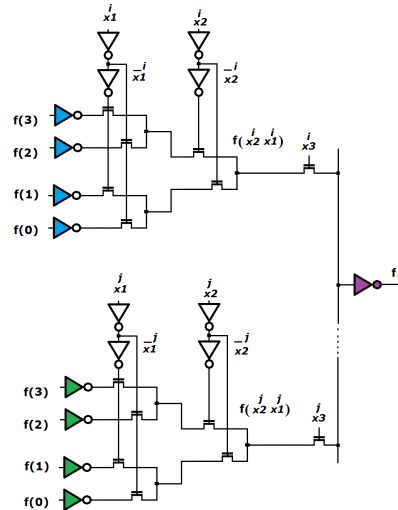


Рис. 6. Выбор одного из $2^2 \cdot 2^{n-2}$ значений функции f унитарным кодом входного вектора $0000\dots x_3^j x_2^j x_1^j 000000$

Возникает задача нахождения оптимальной декомпозиции по Шеннону – по нескольким переменным, так, чтобы и трассировка переменных, и LUT были не слишком сложными, с одной стороны, и задержка на вычисление логической функции не слишком увеличилась, с другой.

Предлагается также LUT с двумя выходами декомпозиции по старшей переменной (рис. 7).

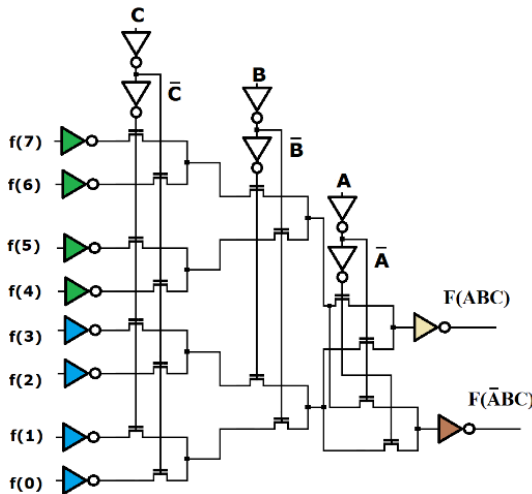


Рис. 7. LUT-3 с двумя предлагаемыми выходами декомпозиции по старшей переменной A , $F(ABC)$ – существующий выход

Функционирование предлагаемого LUT-3 в зависимости от значения старшей переменной показано на рис. 8.

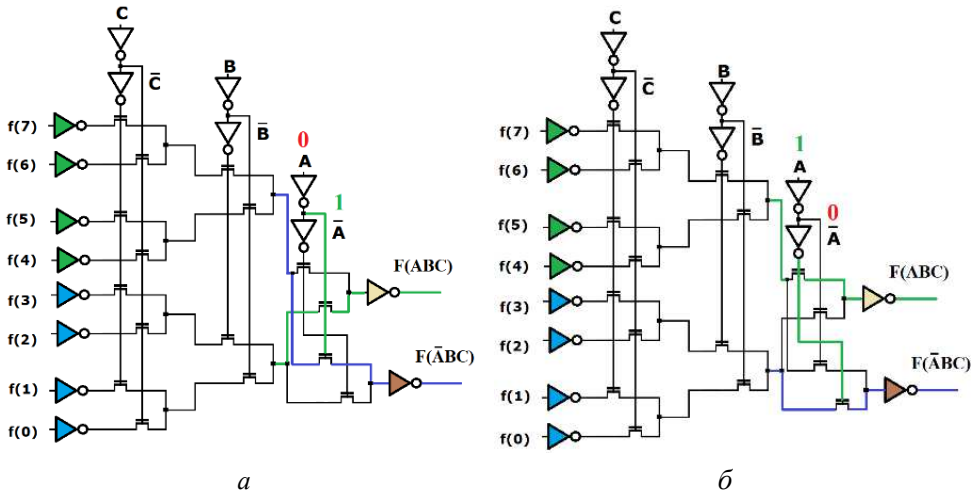


Рис. 8. Функционирование предлагаемого LUT-3:
 а – старшая переменная $A = 0$; б – старшая переменная $A = 1$

В этом случае создается возможность контроля функционирования LUT путём тестирования с использованием математического аппарата булевых производных, описанного, например, в [20]. Для этого необходимо создать тест, т.е. такие функции, в которых изменение старшей переменной приводит к разным значениям подфункций.

Выводы. Таким образом, для обеспечения быстродействия ПЛИС разработчики передовых фирм идут по пути усложнения проектов с использованием разложения Шеннона, что позволяет, кроме прочего, уменьшить длину обратной связи в последовательном автомате.

Следует ожидать увеличение возможностей комбинационных реализаций схем конечных автоматов, традиционно реализуемых последовательно в силу имеющихся ранее ограничений на количество логических элементов и объём памяти.

В связи с этим предлагается унитарный LUT, когда активна только одна входная переменная. Похожий принцип используется при маршрутизации связей в ПЛИС. Например, условия для этого создаст унитарное кодирование памяти автомата. Такой LUT будет обладать максимальным быстродействием. Для снижения аппаратных затрат возможно комбинированное кодирование входного вектора, что, конечно, ухудшит быстродействие вычисления значений логических функций.

С целью упрощения контроля таких вычислений предложен LUT с двумя выходами декомпозиции по старшей переменной. Использование модифицированного LUT позволит уменьшить время диагностирования. Целью дальнейших исследований может быть рассмотрение предложенного LUT с встроенным элементом сложения по модулю два.

Библиографический список

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 782 с.
2. Современные реализации ПЛИС [Электронный ресурс]. – URL: <http://fpga.parallel.ru/devices.html> (дата обращения: 31.10.2018).
3. Строгонов А., Цыбин С. Программируемая коммутация ПЛИС: взгляд изнутри [Электронный ресурс]. – URL: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (дата обращения: 11.10.2018).
4. Intel SoC FPGAs [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/soc.html> (дата обращения: 31.10.2018).
5. Systemin Package [Электронный ресурс]. – URL: <https://amkor.com/technology/system-in-package/> (дата обращения: 31.10.2018).
6. SiP Products [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.altera.com/products/sip/overview.html> (дата обращения: 11.10.2018).
7. Виды программируемой логики [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pvsm.ru/programmirovanie/87810> (дата обращения: 10.10.2018).
8. Programmable Logic Devices [Электронный ресурс]. – URL: http://ee.sharif.edu/~logic_circuits_t/readings/PLD.pdf (дата обращения: 04.11.2018).
9. Программируемая логика и её применение в микропроцессорных системах [Электронный ресурс]. – URL: <http://lektsii.org/7-10275.html> (дата обращения: 08.11.2018).
10. CPLD (Complex Programmable Logic Device) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (дата обращения: 09.11.2018).
11. Stephen Brown, Jonathan Rose. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf> (дата обращения: 10.10.2018).
12. INTEL FPGA [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.altera.com/> (дата обращения: 23.10.2018).
13. Xilinx [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html> (дата обращения: 31.10.2018).

14. Logic Array Blocks and Adaptive Logic Modules in Stratix III Devices [Электронный ресурс]. – URL: https://www.altera.com.cn/content/dam/alterawww/global/zh_CN/pdfs/literature/hb/stx3/stx3_siii51002.pdf (дата обращения: 20.10.2018).

15. Ryan Kenny, Jeff Watt. The Breakthrough Advantage for FPGAs with Tri-Gate Technology [Электронный ресурс]. – URL: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01201-fpga-tri-gate-technology.pdf (дата обращения: 12.10.2018).

16. Трёхмерные транзисторы 22нм [Электронный ресурс]. – URL: <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/118816/> (дата обращения: 15.10.2018).

17. Интегрированные транзисторы CMOS tri-gate [Электронный ресурс]. – URL: <http://compress.ru/article.aspx?id=16789> (дата обращения: 24.10.2018).

18. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs [Электронный ресурс]. – URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (дата обращения: 07.11.2018).

19. Understanding How the New Intel®HyperFlex™ FPGA Architecture Enables Next Generation High-Performance Systems [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.altera.com/products/fpga/stratix-series/stratix10/features.html#hyperflexarchitecture> (дата обращения: 27.10.2018).

20. Тюрин С.Ф., Аляев Ю.А. Дискретная математика: практическая дискретная математика и математическая логика. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 394 с.

References

1. Ugriumov E.P. Tsifrovaia skhemotekhnika [Digitalcircuitry: atutorial]. 2nd ed. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2007. 782 p.

2. Sovremennye realizatsii PLIS [Modern FPGA implementation], available at: <http://fpga.parallel.ru/devices.html> (accessed 31 October 2018).

3. Strogonov A., Tsybin S. Programmiruemaia kommutatsiia PLIS: vzgliad iznutri [Programmable switching FPGA: a view from the inside], available at: http://www.kit-e.ru/articles/plis/2010_11_56.php (accessed 11 October 2018).

4. Intel SoC FPGAs, available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/programmable/soc.html> (accessed 31 October 2018).

5. Systemin Package, available at: <https://amkor.com/technology/system-in-package/> (accessed 31 October 2018).

6. SiP Products, available at: <https://www.altera.com/products/sip/overview.html> (accessed 11 October 2018).

7. Vidy programmiruemoi logiki [Types of programmable logic], available at: <http://www.pvsm.ru/programmirovanie/87810> (accessed 10 October 2018).

8. Programmable Logic Devices, available at: http://ee.sharif.edu/~logic_circuits_t/readings/PLD.pdf (accessed 04 November 2018).

9. Программируемая логика и её применение в микропроцессорных системах [Programmable logic and its application in microprocessor systems], available at: <http://lektsii.org/7-10275.html> (accessed 08 November 2018).

10. CPLD (Complex Programmable Logic Device), available at: <http://www.myshared.ru/slide/981511/> (accessed 09 November 2018).

11. Stephen Brown, Jonathan Rose. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial, available at: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf> (accessed 10 October 2018).

12. INTEL FPGA, available at: <https://www.altera.com/> (accessed 23 October 2018).

13. Xilinx, available at: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga.html> (accessed 31 October 2018).

14. Logic Array Blocks and Adaptive Logic Modules in Stratix III Devices, available at: https://www.altera.com.cn/content/dam/alterawww/global/zh_CN/pdfs/literature/hb/stx3/stx3_siii51002.pdf (accessed 20 October 2018).

15. Ryan Kenny, Jeff Watt. The Breakthrough Advantage for FPGAs with Tri-Gate Technology, available at: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wp-01201-fpga-tri-gate-technology.pdf (accessed 12 October 2018).

16. Trekhmernye tranzistory 22nm [Three-dimensional transistors 22nm], available at: <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/118816/> (accessed 15 October 2018).

17. Integrirovannye tranzistory CMOS tri-gate [Integrated CMOS transistors], available at: <http://compress.ru/article.aspx?id=16789> (accessed 24 October 2018).

18. Carl Carmichael. Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs, available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp197.pdf (accessed 07 November 2018).

19. Understanding How the New Intel HyperFlex FPGA Architecture Enables Next Generation High-Performance Systems, available at:

<https://www.altera.com/products/fpga/stratix-series/stratix10/features.html#hyperflexarchitecture> (accessed 27 October 2018).

20. Tiurin S.F. Aliaev Iu.A. Diskretnaia matematika: prakticheskaia diskretnaia matematika i matematicheskaia logika [Discrete mathematics: practical discrete mathematics and mathematical logic]. Moscow: Finansy i statistika, 2010. 394 p.

Сведения об авторах

Тюрин Сергей Феофентович (Пермь, Россия) – заслуженный изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru), профессор кафедры «Математическое обеспечение вычислительных систем» Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Пермь, ул. Букирева, 15).

Чудинов Максим Андреевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: m-chudinov@list.ru), инженер направления мультисервисного доступа ПАО «Морион» (614066, Пермь, шоссе Космонавтов, 111).

About the authors

Tyurin Sergey Feofentovich (Perm, Russian Federation) is a Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru), Professor at the Department of Software Computing Systems Perm State National Research University (614990, Perm 15, Bukireva str.).

Chudinov Maksim Andreevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: m-chudinov@list.ru), Engineer at Department of multiservice access, PJSC "Morion" (614066, Perm, 111, highway Kosmonavtov).

Получено 17.01.2019

УДК 621.313.323

Ф.А. Гельвер^{1,2}, И.В. Белоусов^{1,2}, В.Ф. Самосейко^{1,2}¹Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия²ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский
государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

Приведен анализ различных типов реактивных электрических машин, наиболее часто используемых в регулируемом электроприводе. На основе анализа показано и доказано, что реактивная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора имеет лучшие энергетические, массогабаритные и эксплуатационные характеристики среди различных типов реактивных электрических машин и является самой распространенной асинхронной электрической машиной. Представлены результаты экспериментальных исследований реактивных машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора (РЭМАПР) с установленной мощностью от 1,5 до 500 кВт, а также апробации теории проектирования и управления реактивной электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью. Подробно описаны конструкция и технология изготовления макетного образца ротора реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью с продольной шихтовкой. Проведено сопоставление результатов исследований реактивных электрических машин, у которых свойства анизотропной магнитной проводимости ротора получены за счет его продольной и поперечной шихтовки. По результатам экспериментальных исследований построены различные графики рабочих характеристик электропривода. Выполнено исследование динамических свойств электропривода с РЭМАПР. Приведены временные диаграммы пуска в ход исследуемой электрической машины. Результаты тепловых испытаний позволили установить предельные возможности, заложенные в конструкцию опытного образца машины с номинальной установленной мощностью 500 кВт. Выполнено сравнение опытного образца реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с асинхронной машиной по показателю удельной мощности. Проведенные исследования и испытания позволили выполнить верификацию теоретических исследований и разработанной методики проектирования РЭМАПР и показали их адекватность.

Ключевые слова: реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора, продольный и поперечный контур тока, магнитная проводимость, электромагнитный момент, ток намагничивания, ток нагрузки, экстремум момента, настройка на технический оптимум, робастность.

F.A. Gelver^{1,2}, I.V. Belousov^{1,2}, V.F. Samoseiko^{1,2}

¹Branch of the Central Research Institute SET, FSUE Krylov State Research Center, GUMRF them. Admiral S.O. Makarov, Saint Petersburg, Russian Federation

²GUMRF them. Admiral S.O. Makarov, branch of the Central Scientific Research Institute SET of the Federal State Unitary Enterprise Krylovsky State Research Center, Saint Petersburg, Russian Federation

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF REACTIVE ELECTRICAL MACHINE WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE ROTOR

The analysis of various types of reactive electric tanks of the most frequencies used in an adjustable electric drive is presented. On the basis of the analysis, it has been shown and proved that the reactive machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor has the best energy, weight and size, and operational characteristics among various types of jet electric machines and the most popular asynchronous electric machine. The results of experimental studies of jet machines with anisotropic magnetic conductivity of the rotor (SynRM) with installed capacity from 1.5 kW to 500 kW, as well as approbation of the design and control theory of a reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity are presented. The design and manufacturing technology of a prototype rotor model of a reactive machine with anisotropic magnetic conductivity with longitudinal loading is described in detail. A comparison was made of the results of studies of reactive electric machines, in which the properties of the anisotropic magnetic conductivity of the rotor were obtained by its longitudinal and transverse blending. According to the results of experimental studies, various graphs of the operating characteristics of the electric drive were constructed. The study of the dynamic properties of the electric drive with SynRM. The timing diagrams of the start-up of the investigated electric machine are given. The results of thermal tests allowed us to establish the limiting possibilities inherent in the design of a prototype machine with a nominal installed capacity of 500 kW. A comparison of the prototype of a reactive electric machine with the anisotropic magnetic conductivity of the rotor with an asynchronous machine in terms of specific power. Studies and tests allowed verification of theoretical studies and the developed design methodology of SynRM and showed their adequacy.

Keywords: reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor (SynRM), longitudinal and transverse current loop, magnetic conductivity, electromagnetic moment, magnetizing current, load current, torque extremum, tuning for a technical optimum, robustness.

Введение. Реактивные электрические машины известны достаточно давно [1–3]. Считалось, что такие машины имеют низкие коэффициенты мощности и полезного действия. Поэтому реактивным машинам в электромашиностроении отводилась незначительная роль (диапазон рациональных мощностей – до нескольких киловатт).

В настоящее время на реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора (РЭМАПР) обратили серьезное внимание. Ротор такой электрической машины пассивный и может быть выполнен с применением двух технологии: продольной

шихтовки полюса ротора и поперечной шихтовки ротора со специальными вырезами. Им посвящается все большее количество работ [4] – [9]. Европейский концерн АВВ осуществляет серийный выпуск электроприводов на основе четырехполюсных реактивных электрических машин (SynRM) с поперечной шихтовкой ротора [10].

Принцип действия реактивных машин основан на пульсациях индуктивностей обмоток статора [11–13]. Обмотки статора также могут быть двух видов: с длинными (классическими) лобовыми частями и коротким лобовыми частями, исключаящими взаимную магнитную связь между фазами. Анизотропная магнитная проводимость ротора при его вращении приводит к пульсациям индуктивностей фаз обмоток статора. Реактивные электрические машины с короткими лобовыми частями обмоток, как правило, выполняются с зубчатым статором и ротором и получили в литературе название вентильно-индукторных [14, 15].

В Крыловском научном центре совместно с кафедрой электропривода Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова выполнены теоретические исследования реактивных электрических машин, по результатам которых опубликованы две монографии [16, 17]. Теоретические исследования проводились с целью обоснования перспективности использования РЭМАПР в электроприводах большой мощности (десятки МВт), в частности в электроприводах гребных винтов. Как известно [18, 19], массогабаритные показатели машин определяет величина электромагнитного момента. При прямой связи электрической машины с гребным винтом машины имеют малое число оборотов (100–300 об/мин) и большой электромагнитный момент. Поэтому особенностью гребных электрических машин являются большие массогабаритные показатели. Вследствие чего массогабаритные показатели являются одним из основных критериев выбора гребных электрических машин.

Результаты проведенных исследований [16, 17] показывают, что машины с длинными лобовыми частями обмоток статора имеют меньшие массогабаритные показатели. Поэтому их применение для электрических машин большой мощности является предпочтительным. Реактивные электрические машины, имеющие зубчатый ротор и обмотки с короткими лобовыми частями на статоре, по своим массогабаритным показателям существенно уступают всем другим видам электрических машин [20].

Другим наиболее важным фактором, влияющим на массогабаритные показатели электрической машины, является величина потерь мощности. РЭМАПР не имеют обмоток на роторе и дополнительных обмоток возбуждения на статоре [9]. Это обуславливает их конкурентное преимущество по сравнению с классическими машинами, имеющими обмотки на роторе. У асинхронного электродвигателя наличие обмотки на роторе увеличивает электрические потери по сравнению с РЭМАПР в 1,6–1,8 раза. По показателю электрических потерь РЭМАПР уступают лишь синхронным машинам с постоянными магнитами (СМПМ), у которых токи намагничивания могут отсутствовать. Необходимость намагничивать анизотропный ротор машины приводит к увеличению тока в обмотке статора на 5–13 %. Однако возможность управлять намагниченностью ротора дает РЭМАПР существенные конкурентные преимущества по сравнению с СМПМ. Кроме того, ротор РЭМАПР конструктивно существенно проще и дешевле ротора СМПМ. Следует отметить, что РЭМАПР имеют также лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с СМПМ.

Электромагнитный момент РЭМАПР пропорционален размаху пульсаций индуктивностей. Поэтому важным показателем эффективности РЭМАПР является отношение ξ продольной (максимальной) индуктивности L_d к минимальной (поперечной) L_q . У РЭМАПР с поперечной шихтовкой показатель $\xi \approx 6 \dots 8$, а у машин с продольной шихтовкой $\xi \approx 10 \dots 12$. Поэтому при теоретических исследованиях основное внимание было сосредоточено на РЭМАПР с продольной шихтовкой [21].

На базе выполненных теоретических исследований была разработана методика проектирования РЭМАПР [17]. Для верификации теоретических положений требовалась их экспериментальная проверка, которая была выполнена путем проектирования и изготовления макетных образцов РЭМАПР малой мощности 1,5 кВт, а также на опытном образце мощностью 500 кВт. Параллельно с теоретическими работами велись работы по разработке методов и средств управления ими. Было разработано программное обеспечение для исследования и практического применения электроприводов с РЭМАПР. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований опытного образца РЭМАПР мощностью 500 кВт с целью проверки соответствия параметров, заложенных изготовителем, теоретических положений и методики проектирования, разработанной в Крыловском научном центре.

1. Конструкция и технология изготовления макетного образца. Аппаратные и программные средства для проведения испытаний. Конструкция и технология. Для проверки теоретических положений и работоспособности предложенной конструкции РЭМАПР был спроектирован и изготовлен макетный образец ротора с анизотропной магнитной проводимостью с продольной шихтовкой [22]. Статор был взят от шестипольсного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР90L6У3 с установленной мощностью 1,5 кВт: число пазов 36, число зубцов 36, активная длина магнитопровода статора 111,54 мм.

Полюса ротора с продольной шихтовкой были набраны из загнутых под определенным углом листов электротехнической стали с немагнитными промежутками. Полюса ротора крепятся на шпильки к валу ротора с помощью прижимных шайб и гаек. Параметры ротора: число пластин в полюсе – 15, толщина пластин 0,55 мм, материал пластин – трансформаторная сталь, зазор между пластинами ~ 0,15 мм, диаметр ротора 99,6 мм, активная длина ротора 108,5 мм. На рис. 1 представлена технология изготовления такого ротора.

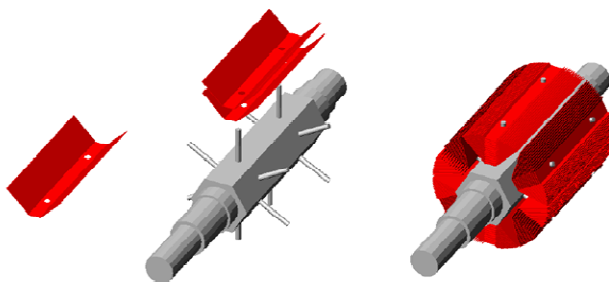


Рис. 1. Технология изготовления ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой

Для придания механической прочности такой конструкции ротора все пустоты между пластинами полюсов и ротором были залиты компаундом на основе эпоксидной смолы, после чего выполнена проточка ротора до требуемого диаметра. Такая технология изготовления позволила в кратчайшие сроки, без использования дорогостоящего оборудования, изготовить ряд роторов различной конструкции.

Так, в частности, были изготовлены роторы со скосом полюсов относительно магнитопровода статора (рис. 2). Скос пакета полюса ротора был выполнен на одно зубцовое деление магнитопровода статора. Использование скоса полюсов ротора относительно магнитопровода статора позволило сгладить зубцовые пульсации индуктивности статорных обмоток и уменьшить пульсации электромагнитного момента. Также для проведения экспериментов по прямому пуску РЭМАПР были изготовлены различные конструкции роторов с пусковой (демпферной) обмоткой.



Рис. 2. Заготовка ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью со скосом полюсов ротора (до компаундирования и проточки)

Испытания макетов РЭМАПР проводились в составе электропривода с преобразователем частоты. При этом отработывалась методика управления такими машинами. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и высокие энергетические характеристики предложенной конструкции реактивной электрической машины. Подробные результаты экспериментальных исследований макетных образцов РЭМАПР с продольной шихтовкой представлены в [22, 23]. По результатам исследований макетных образцов проведена работа по совершенствованию методики проектирования, технологии изготовления и теории управления РЭМАПР. В результате теоретических исследований авторами опубликовано множество научных работ в рецензируемых научных журналах [12], [24–27].

Опытный образец РЭМАПР. В рамках опытно конструкторской работы была спроектирована РЭМАПР с продольной шихтовкой ротора. Однако по ряду причин в ПАО «НИПТИЭМ» была изготовлена РЭМАПР с поперечной шихтовкой ротора [5], габаритный чертеж

которой приведен на рис. 3. Охлаждение машины принудительное жидкостное. Номинальные данные опытного образца РЭМАПР с поперечной шихтовкой, установленные изготовителем, приведены в таблице (взяты с шильдика).

Номинальные данные опытного образца РЭМАПР с поперечной шихтовкой, установленные изготовителем

Тип	Электрические параметры					Масса, кг
	P , кВт	Частота вращения, об/мин	U , В	$\cos \varphi$	I_n , А	
СРД 549/6-ОМ5	500	1000	796	0,77	495	2100

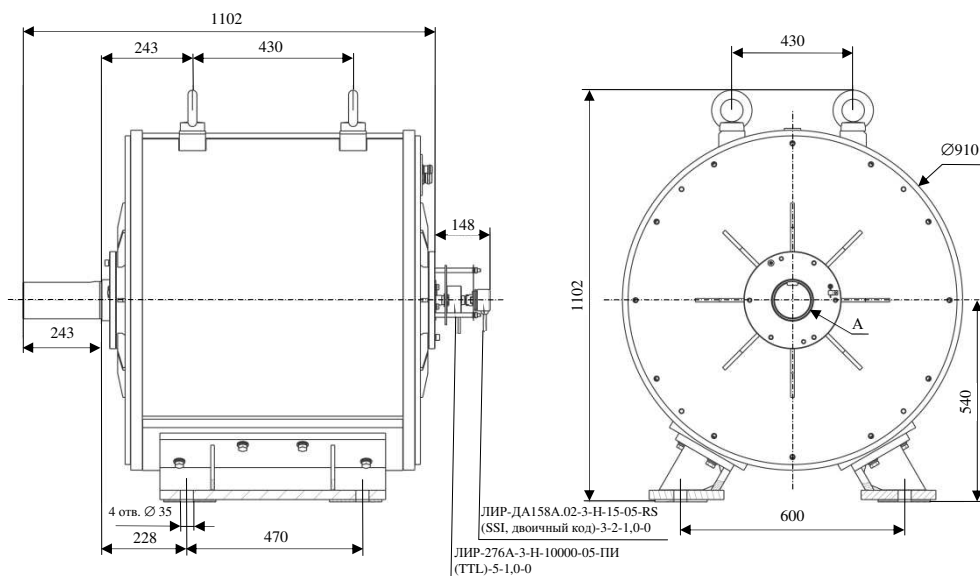


Рис. 3. Габаритный чертеж реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой

На рис. 4 представлено фото ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой ротора.

Аппаратные и программные средства испытаний. Для управления опытным образцом РЭМАПР мощностью 500 кВт был спроектирован и изготовлен преобразователь частоты со звеном постоянного тока. Выпрямление напряжения сети осуществляется двумя трехфазными диодными мостами, образующими двенадцатипульсную схему

выпрямления. Выпрямленное напряжение преобразуется в переменное напряжение трехфазным двухуровневым инвертором напряжения. Фото преобразователя частоты представлено на рис. 5.



Рис. 4. Ротор реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой

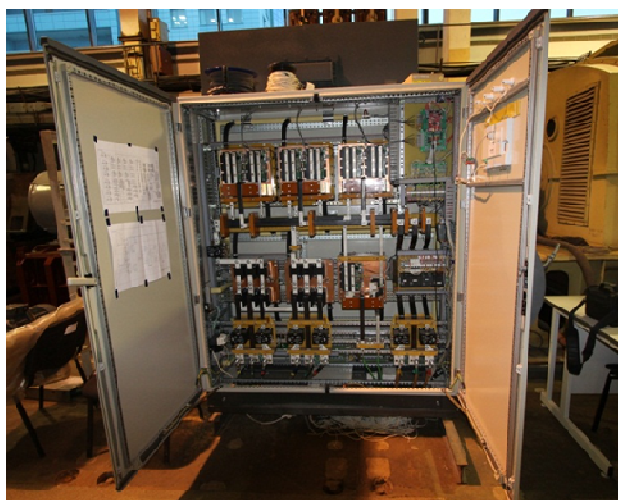


Рис. 5. Преобразователь частоты для управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора

Для управления реактивной электрической машиной была спроектирована, изготовлена и отлажена плата системы управления (рис. 6), которая обладает широкими функциональными возможностями. Она позволяет осуществлять управление различными типами электрических преобразователей и электроприводами с различными типами электрических машин.

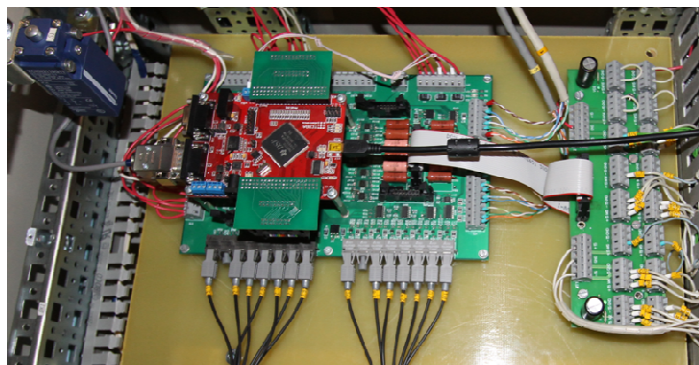


Рис. 6. Платы системы управления

Плата изготовлена с использованием микроконтроллера фирмы Texas Instruments TMS320F28335. Для расширения функциональных возможностей процессорной платы была спроектирована и изготовлена переходная кросс-плата, которая обладает аналоговыми и дискретными входами и выходами и различными интерфейсами связи. В частности, на плате предусмотрено 8 ШИМ-каналов управления силовыми транзисторами с возможностью управления как по оптическому каналу, так и потенциальными сигналами управления, 8 каналов обработки информации ошибок с драйверов. С целью исключения возникновения аварийных ситуаций на плате системы управления предусмотрена аппаратная блокировка одновременного включения верхнего и нижнего силового ключа одного полумоста. На плате системы управления также предусмотрены 16 каналов аналоговых входов, 2 аналоговых выхода, 8 дискретных входов, 4 релейных выхода и 2 транзисторных ШИМ-выхода, а также возможность одновременной обработки информации с абсолютного и инкрементального энкодеров. Помимо того на плате предусмотрены быстродействующие входы и выходы синхронизации, позволяющие использовать несколько плат при управлении сложными электрическими преобразователями, содержащими большое количество полностью управляемых силовых ключей. Широкие функциональные возможности разработанной платы позволяют использовать ее для решения широкого круга задач, связанных с управлением различными электрическими преобразователями и электроприводами на их основе.

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять управление, настройку, а также и осциллографирование переменных управления и значений, получаемых с различных датчиков в режиме

реального времени. На рис. 7 представлен интерфейс пользователя компьютерной системы управления электроприводом на базе реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

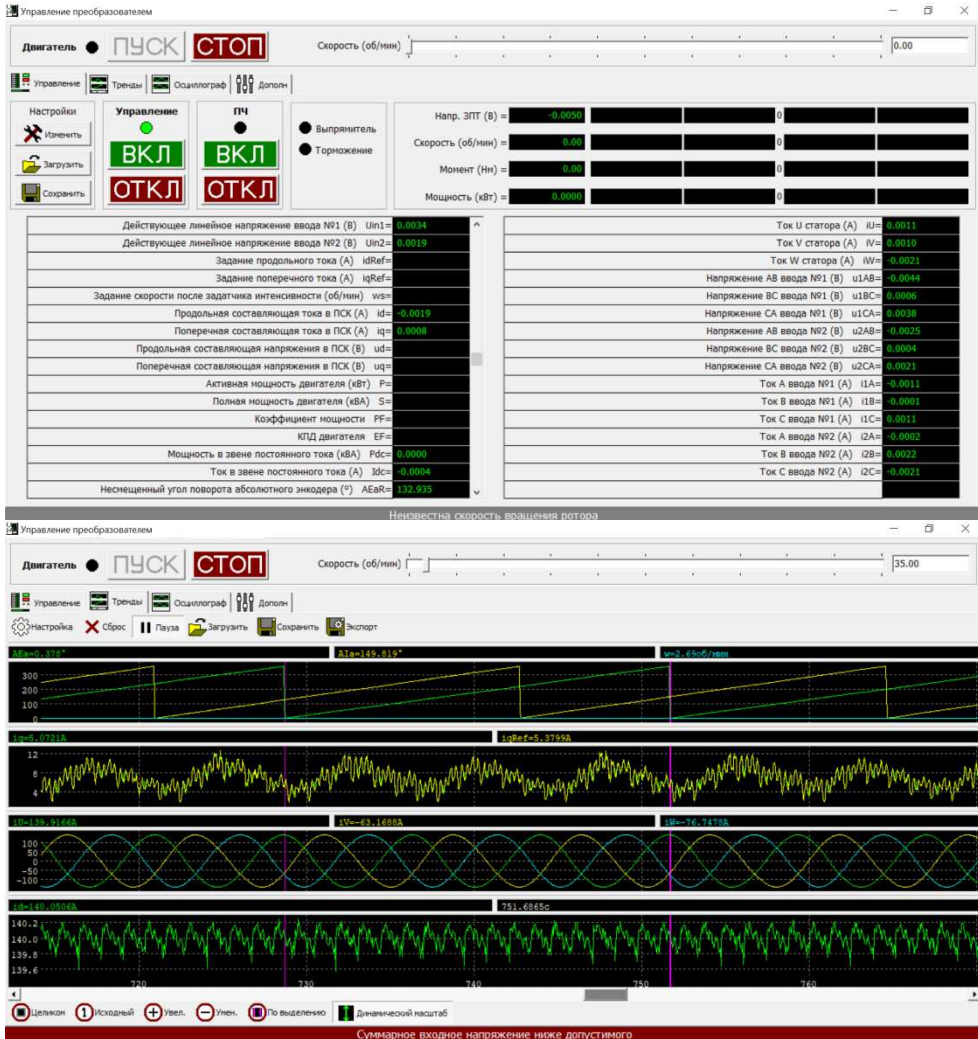


Рис. 7. Интерфейс пользователя

Компьютерная программа позволяет осуществлять построение и запись различных графиков динамических процессов в электроприводе, а также автоматизированно производить идентификацию параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Система управления и программное обеспечение испытаний.

Характеристики электрической машины определяются не только ее параметрами, заложенными при ее изготовлении, но используемой системой управления. В классической теории электрических машин характеристики функционирования машины обычно приводятся при номинальной постоянной амплитуде и частоте синусоидального напряжения [2, 3]. Однако в настоящее время электрические машины обычно питаются от преобразователей частоты, что позволяет использовать для их управления различные алгоритмы. Наиболее распространены алгоритмы управления, предполагающие представление тока статора в виде вектора в системе координат $d-q$, одна из координат которого (обычно d) является током намагничивания i_d , а другая (q) – током нагрузки i_q .

Структурная схема системы управления, использовавшаяся при испытаниях опытного образца РЭМАПР, приведена на (рис. 8). Настройка регуляторов выполнена по принципу технического оптимума. Сигналы управления y_D^* и y_Q^* задают значения соответственно тока намагничивания и нагрузки.

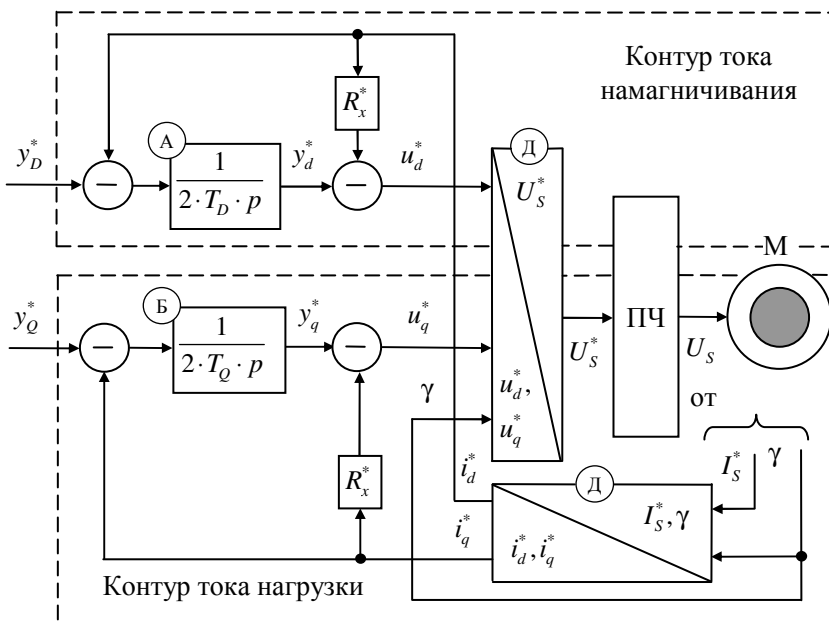


Рис. 8. Структурная схема системы управления реактивной машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора реализующая алгоритм управления с максимальным быстродействием: А – регулятор тока намагничивания; Б – регулятор тока нагрузки; Д – блоки преобразования напряжений и токов статора; ПЧ – преобразователь частоты

Испытательный стенд. Испытания РЭМАПР с номинальной мощностью 500 кВт и номинальным числом 1000 об/мин проводились на испытательной установке, схема которой приведена на рис. 9. Нагрузка РЭМАПР производилась тремя нагрузочными машинами постоянного тока номинальной мощностью 400 кВт и номинальным числом 1500 об/мин. На рис. 10 представлено фото исследовательского стенда опытного образца РЭМАПР (на переднем плане).

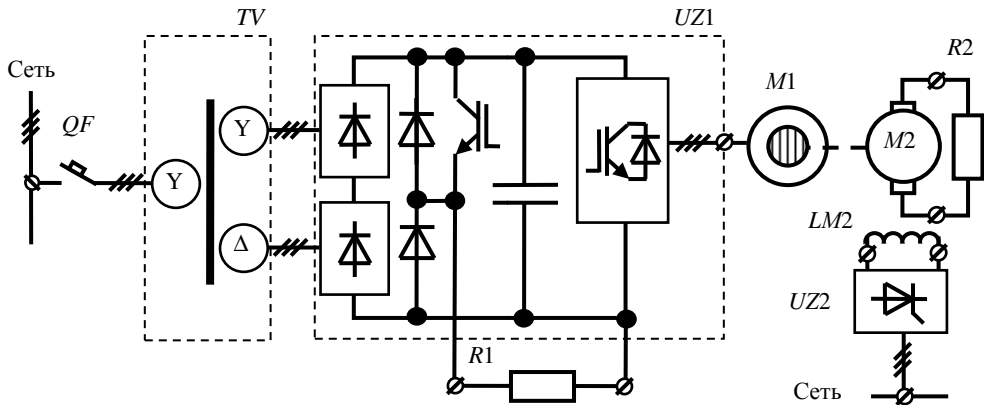


Рис. 9. Схема испытательной установки РЭМАПР: QF – автоматический выключатель; TV – согласующий трансформатор; $UZ1$ – преобразователь частоты; $M1$ – РЭМАПР; $M2$ – нагрузочные машины постоянного тока; $UZ2$ – тиристорный преобразователь; $R1$ – тормозной резистор; $R2$ – нагрузочный резистор



Рис. 10. Исследовательский стенд опытного образца РЭМАПР

2. Результаты статических испытаний опытного образца РЭМАПР. Относительные единицы. При анализе результатов испытаний использованы относительные единицы – отношения именованных величин к базовым. Переменные и параметры, представленные в относительных единицах, помечаются верхним индексом*. За основные базовые величины приняты номинальный ток статора $I_n = 495$ А, номинальное фазное напряжение $U_n = 460$ В и угловая частота сети $\omega_6 = 314$ рад/с. Производные базовые величины определяются из основных по соотношениям:

$$R_6 = U_n / I_n = 0,929 \text{ Ом}; L_6 = R_6 / \omega_6 = 2,96 \text{ мГн};$$

$$P_6 = S_n = 3 \cdot U_n \cdot I_n = 683 \text{ кВт}; M_6 = p_n \cdot P_6 / \omega_6 = 6,53 \text{ кНм};$$

$$\Omega_6 = \omega_6 / p_n = 104,7 \text{ рад/с},$$

где p_n – число пар полюсов электрической машины (для исследуемого макетного образца $p_n = 3$).

Кривые намагничивания – зависимости модуля действующего значения фазного напряжения на обмотке статора U^* от тока намагничивания I_d^* – приведены на рис. 11 при относительных токах нагрузки $I_q^* = 0, 0,5$ и 1.

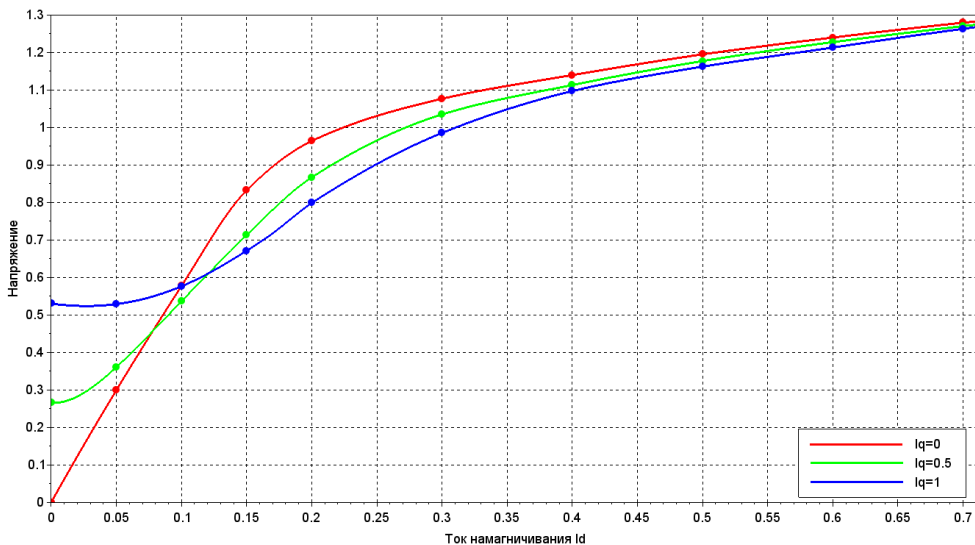


Рис. 11. Кривая намагничивания опытного образца РЭМАПР в относительных единицах

Поскольку номинальный ток намагничивания не определен изготовителем РЭМАПР, то он был выбран по кривой намагничивания, $I_d^* = 0,311$, так, чтобы под номинальной нагрузкой напряжение на обмотках статора было равно номинальному значению. Из значения номинального тока намагничивания номинальный ток нагрузки определен выражением:

$$I_{qn}^* = \sqrt{I_n^{*2} - I_d^{*2}} = 0,95.$$

Таким образом, принятое относительное номинальное значение токов намагничивания и нагрузки $I_d^* = 0,311$ и $I_{qn}^* = 0,95$.

Электромагнитный момент РЭМАПР. В испытательном стенде отсутствовало оборудование для непосредственного измерения электромагнитного момента. Поэтому относительный электромагнитный момент РЭМАПР определяется путем вычислений по формуле:

$$M^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot I_d^* \cdot I_q^*, \quad (1)$$

где L_d^* – полная относительная статическая продольная индуктивность; L_q^* – полная относительная статическая поперечная индуктивность; I_d^* и I_q^* – относительные токи намагничивания и нагрузки в системе координат $d-q$.

Исследования показали, что полная поперечная индуктивность машины не зависит от тока нагрузки, а ее относительная величина при номинальном токе намагничивания и номинальном токе нагрузки $L_q^* = 0,38$. Идентификация полной продольной индуктивности опытного образца РЭМАПР по математической модели показала, что ее величина зависит не только от тока намагничивания, но и от тока нагрузки. На рис. 12 приведена зависимость полной продольной индуктивности обмотки статора от тока нагрузки при номинальном токе намагничивания в относительных единицах. При относительном значении тока нагрузки $I_q^* = 1,18$ полная продольная индуктивность обмотки статора уменьшилась на 21 %.

Таким образом, из приведенных данных следует, что увеличение тока нагрузки ведет к размагничиванию машины и снижению электромагнитного момента. Влияние на полную продольную индуктивность токов нагрузки I_q^* кратностью больше 1,18 оказалось невозможным из-за ограничений по максимальному току преобразователя частоты. Однако из проведенных исследований следует, что целесообразно

варьировать токи намагничивания и нагрузки так, чтобы получать максимальные значения электромагнитного момента при заданном токе обмотки статора.

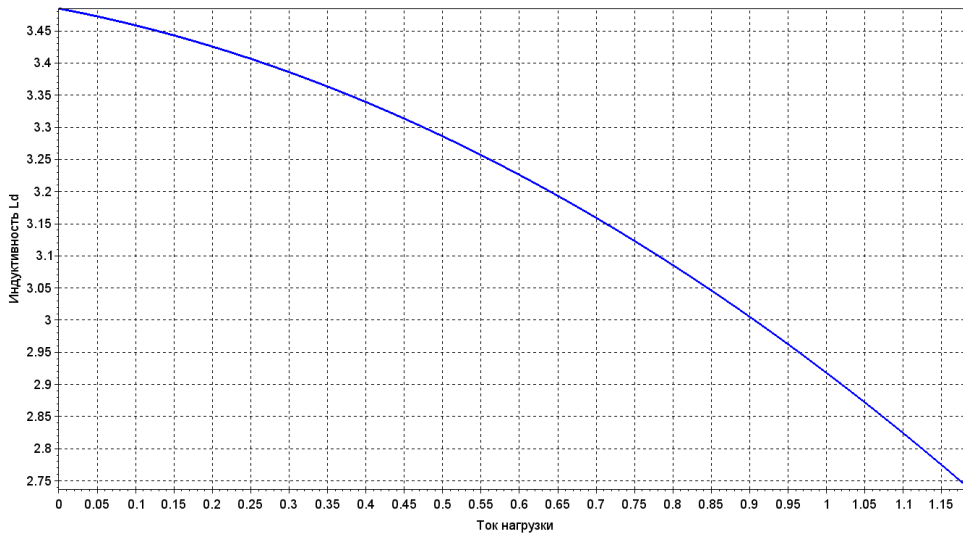


Рис. 12. Зависимость полной продольной индуктивности обмотки статора от тока нагрузки при номинальном токе намагничивания в относительных единицах

Рабочие характеристики. Рабочие характеристики снимались в стационарном режиме работы. Под рабочими характеристиками понимаются зависимости, представленные в относительных единицах, от коэффициента загрузки при номинальном токе намагничивания ($I_d^* = 0,311$) и номинальной частоте ($\omega^* = 1$): частоты вращения ω^* , тока статора I^* , электромагнитного момента M^* , коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ и коэффициента полезного действия η . Коэффициент загрузки машины определяется как отношение $k_3 = I_q/I_{qн}$.

Электромагнитный момент вычислялся по формуле (1). Относительный ток статора вычислялся по формуле:

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}.$$

Коэффициент мощности и коэффициент полезного действия вычислялись по формулам:

$$\cos(\varphi) = \frac{U_d^* \cdot I_d^* + U_q^* \cdot I_q^*}{\sqrt{U_d^{*2} + U_q^{*2}} \cdot \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}}; \quad \eta = \frac{\omega^* \cdot M^*}{U_d^* \cdot I_d^* + U_q^* \cdot I_q^*},$$

где U_d^* и U_q^* – относительные напряжения на обмотке статора в системе координат $d-q$; ω^* – относительная частота токов статора.

Графики рабочих характеристик при постоянном токе намагничивания приведены на рис. 13.

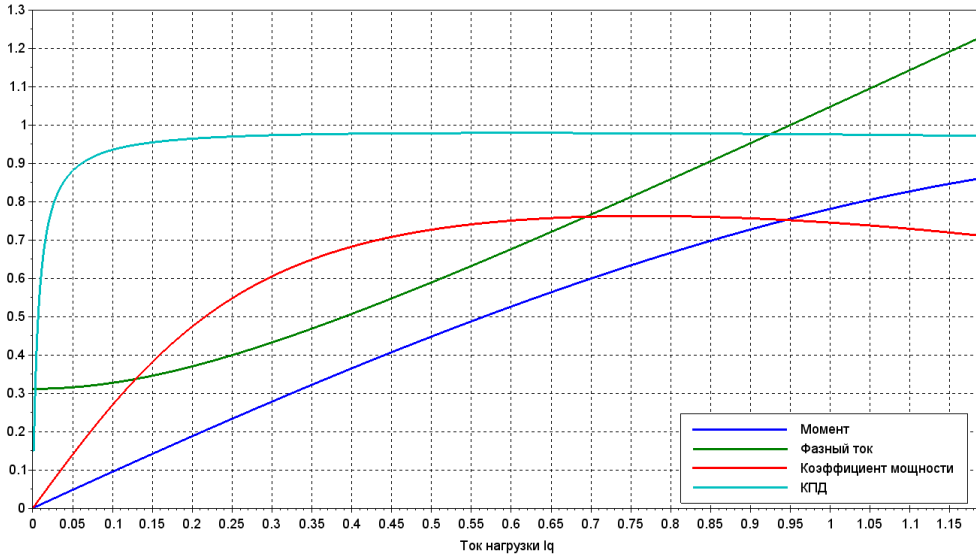


Рис. 13. Рабочие характеристики РЭМАПР в относительных единицах при постоянном номинальном токе намагничивания

Динамические характеристики РЭМАПР. Динамические характеристики определяются как физическими параметрами машины, так и настройками системы управления. Испытания опытного образца РЭМАПР проводились при использовании алгоритма управления, определенного структурной схемой, представленной на рис. 8, и настройке регуляторов тока намагничивания и нагрузки на технический оптимум. В результате испытаний снимались переходные характеристики переменных состояния электропривода: относительный ток намагничивания i_d^* и нагрузки i_q^* , а также относительная скорость вращения ротора ω^* .

На рис. 14 представлены графики переходного процесса при пуске в ход РЭМАПР без осуществления предварительного намагничивания, а на рис. 15 – графики переходного процесса при пуске в ход РЭМАПР с предварительным намагничиванием током $I_d^* = 0,311$, при этом максимальная величина пускового тока I_q^* была ограничена возможностями преобразователя частоты ($I^* = 1,227$) и не могла превышать значения 1,18.

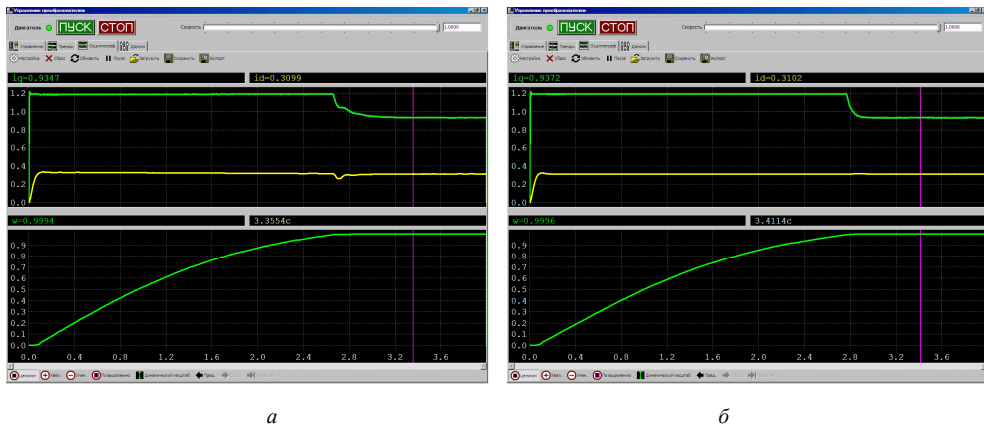


Рис. 14. Графики токов статора i_d^* , i_q^* и скорости вращения ротора ω^* при пуске без предварительного намагничивания в относительных единицах:
 а – без компенсации влияния тока i_q^* на i_d^* ; б – с компенсацией

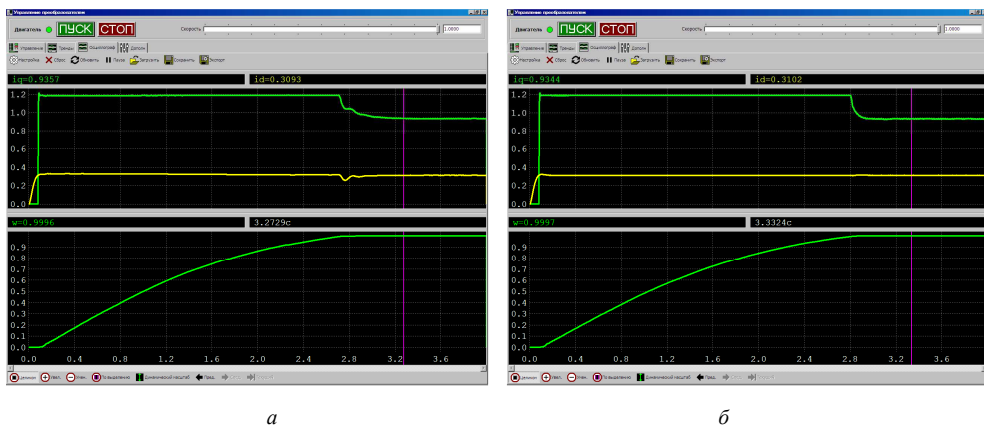


Рис. 15. Графики токов статора i_d^* , i_q^* и скорости вращения ротора ω^* при пуске с предварительным намагничиванием в относительных единицах:
 а – без компенсации влияния тока i_q^* на i_d^* ; б – с компенсацией

Тепловые испытания РЭМАПР. Тепловой режим работы машины определяет нагрузка. Наиболее нагретым элементом машины является обмотка статора. На тепловое повреждение изоляции приходится наибольшее число отказов. Чем выше нагрузка, тем выше температура изоляции обмотки статора. Ресурс изоляции уменьшается вдвое при увеличении рабочей температуры на каждые $10\text{ }^\circ\text{C}$ и может быть вычислен по формуле

$$T \approx T_n \cdot \exp(\Delta\tau / 15),$$

где $\Delta\tau$ – снижение температуры относительно температурного индекса изоляции, в $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{н}}$ – ресурс изоляции при нагреве до температуры, соответствующей температурному индексу ($T_{\text{н}} = 20\,000$ ч). Температурный индекс изоляции класса H составляет 180°C . Обычно для повышения ресурса машины допустимую температуру нагрева изоляции снижают на $\Delta\tau = 20^{\circ}\text{C}$ относительно ее температурного индекса. Допустимая температура обмотки для изоляции класса H составляет 160°C .

При тепловых испытаниях температура нагрева обмотки измерялась в ее лобовой части. Температура окружающей среды при тепловых испытаниях составляла $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний показали, что при длительном режиме работы с номинальным значением относительного тока статора $I_{\text{н}}^* = 1$ температура перегрева обмотки составила $71,8^{\circ}\text{C}$. При относительном токе статора $I^* = 1,227$ температура перегрева обмотки статора составила 108°C . Температуре перегрева обмотки 120°C в длительном режиме работы будет соответствовать относительное значение тока $I^* = 1,29$. При этом расчетный ресурс изоляции обмотки составит $80\,000$ ч.

Выводы. Испытания опытного образца РЭМАПР показали, что он удовлетворяет заявленным данным и может быть использован на судах в качестве гребного электродвигателя. При принятом относительном значении тока намагничивания $I_d^* = 0,311$ коэффициент мощности машины при номинальном токе нагрузки достигает значения $0,76$. Исследования показали, что для достижения максимального электромагнитного момента целесообразно поднять относительный ток намагничивания до $I_d^* = 0,45$, а напряжение увеличить на 11% . При этом коэффициент мощности составит $0,75$, а номинальная мощность, которую можно получить на валу электрической машины, составит 565 кВт. Номинальный коэффициент полезного действия машины составил $0,97$.

Тепловые испытания показали, что установленное номинальное значение тока статора 495 А может быть повышено до значения 650 А. В этом случае температура перегрева обмотки РЭМАПР будет составлять 120°C , а мощность на валу – 670 кВт при ресурсе изоляции обмотки $80\,000$ ч.

Удельная масса опытного образца РЭМАПР при мощности 670 кВт составит $3,13$ т/МВт. Аналогичный образец асинхронной машины имеет удельную массу ~ 6 т/МВт.

Проведенные испытания позволили выполнить верификацию теоретических исследований и разработанной методики проектирования РЭМАПР, а также показали их адекватность.

Библиографический список

1. Кононенко Е.В. Синхронные реактивные машины. – М.: Энергия, 1970. – 208 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для студ. высш. учеб. завед. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Шрейнер Р.Т., Шилин С.И., Медведев А.В. Математическое моделирование синхронных реактивных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода // Электроприводы переменного тока – ЭПТТ: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 26–30 марта 2018 г. – Екатеринбург, 2018. – С. 58–63.
5. Захаров А.В. Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бернадосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2015. – С. 124–127.
6. Tammi A., Termini P., Kansakangas T. Magnet-free motor technology for field speed applications reaching “IE5” efficiency level // Eemods 15, Helsinki 15–17 September 2015. – URL: http://www.eemods15.info/midcomserveattachmentguid-1e55dfbb33f02fc5dfb11e5ac6fc777b4bb692d692d/motor_s6_ari_tammi.pdf
7. Oprea C., Dziechciarz A, Martis C. Comparative analysis of different synchronous reluctance motor topologies // International Conference on Environment and Electrical Engineering; June 10–13, 2015. – Rome, 2015.
8. Characteristics analysis and optimum design of anisotropy rotor synchronous reluctance motor using coupled finite element method and response surface methodology / J. Ho Lee, K. Lee, Y. Hyun Cho, T. Won Yun // IEEE Transactions on Magnetics. – October 2009. – Vol. 45. – P. 4696–4699.
9. Development of a high efficient electric drive with synchronous reluctance motor / V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev, A. Pozdeev, S. Oshurbekov // Electrical Machines and Systems (ICEMS): 18th International Conference on, IEEE, Pattaya, Thailand. – October 2015. – № 4. – P. 876–881.

10. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications // Katalog ABB. – June, 2013. – URL: <http://www.abb.com/motors&generators>

11. Самосейко В.Ф. Теоретические основы управления электроприводом. – СПб.: Элмор, 2007. – 464 с.

12. Гельвер Ф.А. Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электрический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП 2014) (г. Саранск, 7–9 октября 2014 г.). – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 394–398.

13. Казакбаев В.М. Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 128 с.

14. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.

15. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели // СПб. ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор». – СПб., 2003. – 148 с.

16. Реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, В.А. Хомяк, Н.А. Лазаревский. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2016. – 174 с.

17. Синхронные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, В.А. Хомяк, Д.А. Хайров. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2016. – 174 с.

18. Гельвер Ф.А., Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электромеханический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП 2014) (г. Саранск, 7–9 октября 2014 г.). – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 394–398.

19. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев [и др.] // Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015): материалы XVI науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г.). – Екатеринбург, 2015. – С. 19–22.

20. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А. Сравнение различных типов реактивных электрических машин по энергетическим показателям // Труды Крылов. гос. науч. центра. – СПб., 2015. – № 89(373). – С. 201–208.

21. Пат. RU2013118822 (А) Рос. Федерация, МПК H02K1/22, H02K19/20. Синхронная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, Н.А. Лазаревский, И.В. Гагаринов, В.А. Хомяк; заяв. и патентообл. ООО «Науч.-производ. центр "Судовые электротехнические системы"» (ООО НПЦ «СЭС»). № 2541513; заявл. 23.04.2013, опубл.27.10.2014. Бюл. № 30.

22. Гельвер Ф.А. Реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Материалы конф. молодых и спец. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2014. – С. 25–34.

23. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А. Синхронная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды Крылов. гос. науч. центра. – СПб., 2014. – Т. 2, № 365. – С. 143–150.

24. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Белоусов И.В. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе // Труды 9-й Междунар. (10-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2016; Пермь, 3–7 октября 2016 г. (ICPDS 2016). – Пермь, – С. 359–363.

25. Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф. Магнитные проводимости многополюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 27. – С. 7–29.

26. Перспективный электропривод на основе реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, И.В. Белоусов, А.В. Саушев // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: Новочеркасск, 3–6 октября. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 9–13.

27. Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф. Магнитные проводимости двухполюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–81.

References

1. Kononenko E.V. Sinkhronnye reaktivnye mashiny [Synchronous reluctance motor]. Moscow: Energiia, 1970. 208 p.
2. Ivanov-Smolenskii A.V. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. Moscow: Energiia, 1980. 928 p.
3. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. Leningrad: Energiia, 1978. 832 p.
4. Shreiner R.T., Shilin S.I., Medvedev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sinkhronnykh reaktivnykh dvigatelei v sostave chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Mathematical modeling of synchronous reluctance motors as part of a variable frequency drive]. *Elektroprivody peremennogo toka - EPPT. Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 26-30 March 2018. Ekaterinburg, 2018, pp. 58-63.
5. Zakharov A.V. Perspektivy tekhnicheskogo primeneniia sinkhronnykh elektrodvigatelei s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Prospects for the technical application of synchronous motors with rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Sostoianie i perspektivy razvitiia elektrotekhnologii (XVIII Bernadosovskie chteniia). Tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Ivanovo, 2015, pp. 124-127.
6. Tammi A., Termini P., Kansakangas T. Magnet-free motor technology for field speed applications reaching “IE5” efficiency levelю. Eemods 15, Helsinki 15-17 September 2015, available at: http://www.eemods15.info/midcom-serveattachmentguid-1e55dfbb33f02fc5dfb11e5ac6fc777b4bb692d692d/motors6_ari_tammi.pdf
7. Oprea C., Dziechciarz A, Martis C. Comparative analysis of different synchronous reluctance motor topologies. *International Conference on Environment and Electrical Engineering*, June 10-13, 2015. Rome, 2015.
8. Ho Lee J., Lee K., Hyun Cho Y., Won Yun T. Characteristics analysis and optimum design of anisotropy rotor synchronous reluctance motor using coupled finite element method and response surface methodology. *IEEE Transactions on Magnetics*. October 2009, vol. 45, pp. 4696-4699.
9. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Pozdeev A., Oshurbekov S. Development of a high efficient electric drive with synchronous reluctance motor. *Electrical Machines and Systems (ICEMS): 18th International Conference on, IEEE, Pattaya, Thailand*. October 2015, no. 4, pp. 876-881.

10. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications. *Katalog ABB*. June, 2013, available at: <http://www.abb.com/motors&generators>

11. Samoseiko V.F. Teoreticheskie osnovy upravleniia elektroprivodom [Theoretical basics of motor control]. Saint Petersburg: Elmor, 2007. 464 p.

12. Gel'ver F.A., Belousova N.V., Samoseiko V.F. Reaktivnyi elektricheskii preobrazovatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electric converter with anisotropic magnetic rotor conductivity]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP 2014)*, 7-9 October 2014. Saransk: Mordovskii universitet, 2014, pp. 394-398.

13. Kazakbaev V.M. Razrabotka vysokoeffektivnogo sinkhronnogo reaktivnogo dvigatel'ia [Development of high-performance synchronous reluctance motor]. Abstract of Ph.D. thesis. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2017. 128 p.

14. Bychkov M.G. Elementy teorii ventil'no-induktornogo elektroprivoda [Elements of the theory of valve-inductor electric]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 8, pp. 35-44.

15. Gollandtsev Iu.A. Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli [Valve inductor-jet engines]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr Rossiiskoi Federatsii AO "Kontsern "TSNII "Elektroprivor", 2003. 148 p.

16. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A., Lazarevskii N.A. Reaktivnye elektricheskie mashiny s zubchatym statorom i rotorom. Metodika proektirovaniia. Algoritmy upravleniia [Reactive electric machine with crenellated stator and rotor. The design technique. Control algorithms]. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016. 174 p.

17. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A., Khairov D.A. Sinkhronnye elektricheskie mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora. Metodika proektirovaniia. Algoritmy upravleniia [Synchronous electrical machines with anisotropic magnetic rotor conductivity. The design technique. Control algorithms]. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016. 174 p.

18. Gel'ver F.A., Belousova N.V., Samoseiko V.F. Reaktivnyi elektromekhanicheskii preobrazovatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electromechanical transducer with anisotropic mag-

netic rotor conductive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP 2014)*, 7-9 Oktober 2014. Saransk: Mordovskii universitet,, 2014, pp. 394-398.

19. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A., Kazakbaev V.M. et al. Eksperimental'noe sravnenie asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo elektrodvigatelyi [An experimental comparison of asynchronous and synchronous reluctance motors]. *Elektroprivody peremennogo toka (EPPT 2015). Materialy XVI Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 05-09 Oktober 2015. Ekaterinburg, 2015, pp. 19-22.

20. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A. Sravnenie razlichnykh tipov reaktivnykh elektricheskikh mashin po energeticheskim pokazateliam [Comparison of different types of reactive electric cars on the energy performance of]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. Saint Petersburg, 2015, no. 89(373), pp. 201-208.

21. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F., Lazarevskii N.A., Gagarinov I.V., Khomiak V.A. Sinkhronnaia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Synchronous machine rotor magnetic anisotropic conductivity]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2541513 (2014).

22. Gel'ver F.A. Reaktivnaia elektricheskaiia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electrical machine with a rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Materialy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov*. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2014, pp. 25-34.

23. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A. Sinkhronnaia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Synchronous machine rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. Saint Petersburg, 2014, vol. 2, no. 365, pp. 143-150.

24. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Belousov I.V. Perspektivy ispol'zovaniia reaktivnykh elektricheskikh mashin v elektroprivode [Prospects for the use of reactive electric cars in the drive]. *Trudy 9-i Mezhdunarodnoi (10-i Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2016*, 3-7 Oktober 2016. Perm, pp. 359-363.

25. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F. Magnitnye provodimosti mnogopoliusnoi reaktivnoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Magnetic conductance multipolar reluctance machine with

anisotropic magnetic rotor conductive]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 27, pp. 7-29.

26. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F., Belousov I.V., Saushev A.V. Perspektivnyi elektroprivod na osnove reaktivnoi elektricheskoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Promising actuator based reactive electric machine with a rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018*, 3-6 October. Novocherkassk: Lik, 2018, pp. 9-13.

27. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F. Magnitnye provodimosti dvukhpoliusnoi reaktivnoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Magnetic conductance of the bipolar reluctance machine with anisotropic magnetic rotor conductive]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 71-81.

Сведения об авторах

Гельвер Фёдор Андреевич (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6), доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: gелver@bk.ru).

Белоусов Игорь Владимирович (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6, e-mail: ibel@bk.ru).

Самосейко Вениамин Францевич (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: samoseyko@mail.ru).

About the authors

Gelver Fedor Andreevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory of the branch “TsNII SET” Krylov State Research Center (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str.), Associate Professor "Electric drive and electrical equipment of shore installations" GUMRF them. Admiral S.O. Makarov (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: gelver@bk.ru).

Belousov Igor Vladimirovich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Associate Professor of the Department “Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations” FSBEI HE “GUMRF them. Admiral S.O. Makarov (196128, Saint Petersburg, 1980, 5/7, Dvinskaya str.), leading engineer of the branch «TsNII SET» FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr» (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str., e-mail: ibel@bk.ru).

Samoseiko Veniamin Frantsevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of the electric drive and electrical equipment onshore installations Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: samoseyko@mail.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 621.391

Р.Н. Абдулов¹, Х.Г. Асадов²

¹НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики, Баку, Азербайджанская Республика

²НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства, Баку, Азербайджанская Республика

НОВЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ GPS НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Статья посвящена разработанному новому методу ослабления влияния специально сформированного мешающего сигнала на работу GPS навигационных систем. Рассматривается воздействие мешающего сигнала типа помехи (jamming), излучаемого техническими средствами противника. При генерации помехового сигнала соответствующей частоты и достаточной мощности противником ставится цель достичь невозможности приема GPS-сигналов. Предлагаемый метод основан на базовом уравнении теории антенн, каковым является уравнение Фриса. Согласно уравнению Фриса может быть вычислена мощность, принимаемая антенной одной из сторон, с определенным коэффициентом усиления при излучении сигнала с другой антенны известным коэффициентом усиления. Предложен новый показатель, вычисляемый путем интегрирования по пройденному пути формулы Фриса в предположении статичности позиции источника помехи. На основе исследования введенного показателя, представляющего собой интегрированное по пройденной объектом трассе выражение формулы Фриса, сформирован функционал цели проводимой оптимизации с учетом неподвижности позиции генератора помехи. При этом допускается неизменность направленности объекта к цели, содержащей генератор помехи. Также учитываются возможные стратегии изменения мощности помехи при передвижении объекта по трассе. Показано, что предлагаемый показатель имеет экстремальный характер при прямой или инверсной идентичности коэффициентов усиления антенн объекта и генератора помехи: при прямой идентичности вновь введенный показатель достигает минимума, а при инверсной идентичности – максимума. С учетом экстремальных свойств предложенного нового показателя разработаны метод и алгоритм ослабления влияния помехи на работу GPS навигационных систем различных технических устройств.

Ключевые слова: уравнение Фриса, антенна, атмосфера, погрешность, навигационная система, оптимизация, функционал.

R.N. Abdulov¹, H.H. Asadov²

¹Research Institute of Ministry of Defense Industry of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic

²Research Institute of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic

NEW METHOD FOR INCREASE OF ANTI-JAMMING STABILITY OF GPS NAVIGATION SYSTEMS

The paper is devoted to the developed new method for decrease of effect of specially formed hindering signals on functioning of GPS navigation system. The effect of hindering signal of jamming type irradiated by technical means of adversary side is considered. Generation of hindering signal of relevant frequency and sufficient power by adversary is carried out by the aim to reach the condition of non-possibility of receipt of GPS signals. The suggested method is based on basic equation of aerial theory, that is Fresnel's equation. According to Fresnel's equation the power of signal receipt by antenna of one of sides with suggested gain coefficient can be calculated upon irradiation of signal from other antenna with known gain coefficient. The new parameter calculated by integration of Fresnel's formula on passed route supposing static character of jamming source position is suggested. On the basis of research of suggested parameter that is an integrated on passed route Fresnel's formula the target functional is formed taking into account the motionless position of jamming signal of generator and non-changeable direction of object toward target containing jamming signal generator. The possible strategies for changing the jamming signal power on transition of object on route are also taken into account. It is shown that suggested parameter is of extremum feature upon direct or inverse identity of gain coefficient of antennas of object and jamming signal generator: upon direct identity the suggested parameter reaches the minimum and upon inverse identity maximum. Taking into account the extremum feature of suggested parameter the method and algorithm for decrease of effect of jamming signal on functioning of GPS navigation systems of various technical constructions are developed.

Keywords: Fresnel's equation, antenna, atmosphere, error, navigation system, optimization, functional.

Как отмечено в работе [1], одним из фундаментальных уравнений теории антенн является уравнение Фриса. Уравнение передачи Фриса позволяет вычислить мощность, принимаемую первой антенной, с коэффициентом усиления G_1 при передаче сигнала со второй антенны с коэффициентом усиления G_2 . При этом расстояние между антеннами равно R , а излучение осуществляется на длине волны λ частотой f (рис. 1).

Согласно закону Фриса мощность принятого сигнала может быть определена как

$$P_R = \frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi R^2)}, \quad (1)$$

где: P_T – мощность передаваемого сигнала; P_R – мощность принятого сигнала; G_T – коэффициент усиления передающей антенны; G_R – коэффициент усиления приемной антенны.

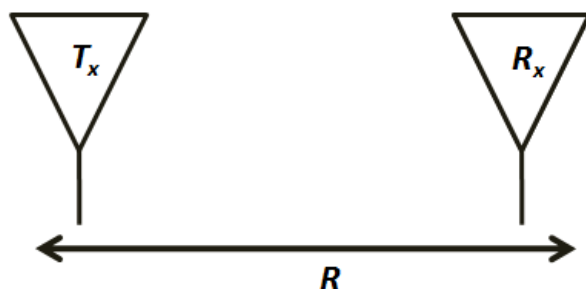


Рис. 1. Передающая T_x и приемная R_x антенны, находящиеся на расстоянии R друг от друга

Заметим что формула (1) является в некоторой степени упрощенной, так как здесь влияние атмосферного затухания не учитывается. Более совершенная формула для вычисления P_R с учетом атмосферного затухания приведена в [2–4]:

$$P_R = P_T + G_T(\theta_T, \alpha_T) + G_R(\theta_R, \alpha_R) + \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \cdot (1 - |\Gamma_T|^2) \cdot (1 - |\Gamma_R|^2) \cdot |a_T \cdot a_R|^2 \cdot e^{-\alpha R}, \quad (2)$$

где θ_T, φ_T – направление излучения передающей антенны; θ_R, φ_R – направление приема приемной антенны; Γ_T – коэффициент отражения передающей антенны; Γ_R – коэффициент отражения приемной антенны; a_T, a_R – поляризационные векторы передающей и приемной антенн соответственно; α – коэффициент ослабления атмосферы.

Согласно [2] различные технические комплексы и системы, зависящие от GPS, потенциально подвержены влиянию различных электромагнитных воздействий (атак). Разделяют воздействие мешающего сигнала типа помехи (jamming) и воздействие ложного управляющего сигнала (spoofing), сформированного противником. В первом случае ставится цель достичь невозможности приема GPS-сигналов путем генерации сигналов соответствующей частоты и достаточной мощности. Во втором случае цель – формирование ложного управляющего сигнала, неотличимого от настоящего. Например, в 2011 г. технические службы Ирана заставили осуществить управляемый спуск дрона RQ-170 Sentinel, сформировав соответствующий сигнал управления [2]. В качестве примера на рис. 2 приведена зависимость погрешности GPS систем при разных мощностях частотной помехи.

С появлением систем спутниковой навигации (Navstar GPS, Glonass, EU Galileo) эти средства стали использоваться с целью навигационного

управления различными техническими средствами. В отличие от инерциальных технических средств навигации спутниковые средства не аккумулируют погрешность позиции во времени, и совместное использование спутниковых и инерциальных средств позволяет периодически корректировать показания инерциальных средств навигации [5, 6].

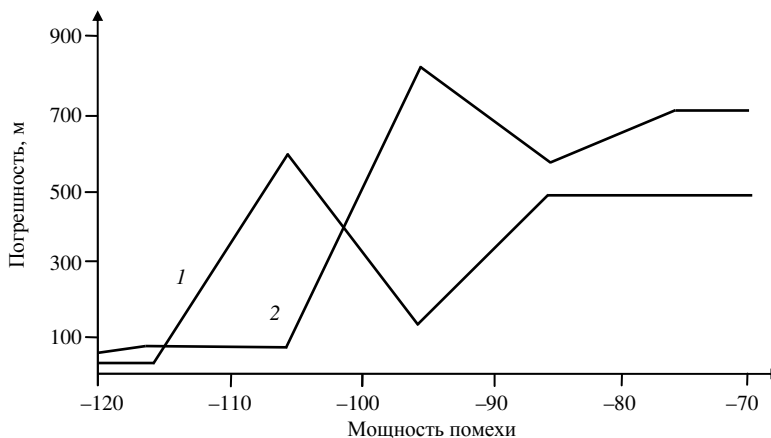


Рис. 2. Увеличение погрешности GPS-системы до 700 м при угле наклона между антеннами 0° (кривая 2) и при угле 6° (кривая 1), когда погрешность увеличивается до 500 м [2]

Следует отметить, что интегрированные навигационные системы типа GPS/INS обычно имеют две конфигурации в виде слабосвязанной и сильносвязанной системы [7–11]. Структурные схемы таких систем показаны на рис. 3, а, б соответственно.

Как видно из рис. 3, а, в слабосвязанной системе GPS имеет свой внутренний фильтр Кальмана для обработки данных спутниковых псевдоранговых и дельта-измерений. На основе этих данных формируются значения позиций и скоростей в координатах WGS-84. Эти данные сравниваются с аналогичными данными INS-системы, и разностный сигнал подается на навигационный фильтр Кальмана, который формирует корректировочные сигналы для INS-системы.

Недостаток такой структуры – наличие двух фильтров, что может создать проблемы стабильности в работе навигационного фильтра при высокодинамичных ситуациях.

В сильносвязанных структурах данный фильтр Кальмана формирует корректирующие сигналы GPS, предварительно сформировав

оценки дрейфов и смещений в системе. Предсказанные псевдоранговые и дельта-ранговые данные INS-системы сравниваются с данными GPS, разностные сигналы подаются на вход навигационного фильтра.

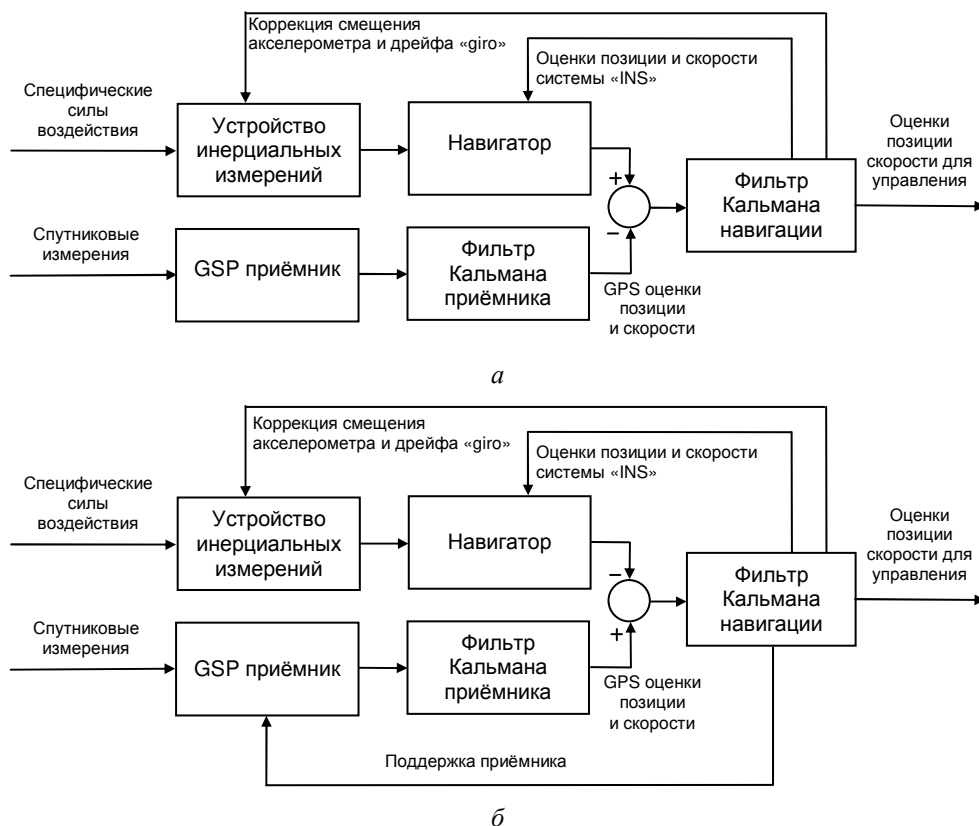


Рис. 3. Структурные схемы: а – слабосвязанной GPS/INS навигационной системы; б – сильносвязанной GPS/INS навигационной системы

Согласно [12–13] помехоустойчивость и точность навигации в сильносвязанных GPS/INS-системах выше, чем у слабосвязанных.

На рис.4, а, б приведены графики зависимости погрешности навигации в метрах от мощности широкополосного и узкополосного помехового сигнала для слабосвязанных и сильносвязанных систем [12].

Как отмечается в работе [7], на помехоустойчивость GPS/INS навигационных систем также влияют антенны. В качестве примера на рис. 5 приведены графики зависимости расстояния до источника помех, когда навигационная система все еще устойчиво работает от типа приемной антенны и мощности помехи. Как видно из графиков,

представленных на рис. 5, полусферическая антенна с углом среза 8° обеспечивает более устойчивую работу навигационной системы, чем сферическая антенна.

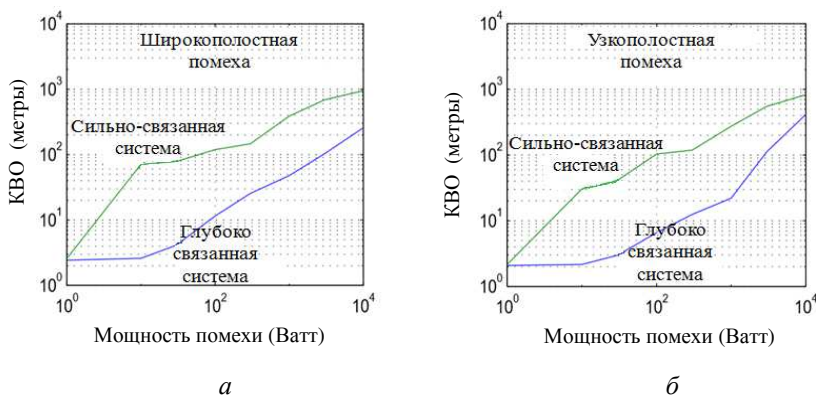


Рис. 4. Графики зависимости погрешности навигации от мощности широкополосного (а) и узкополосного (б) помехового сигнала разной мощности [12]

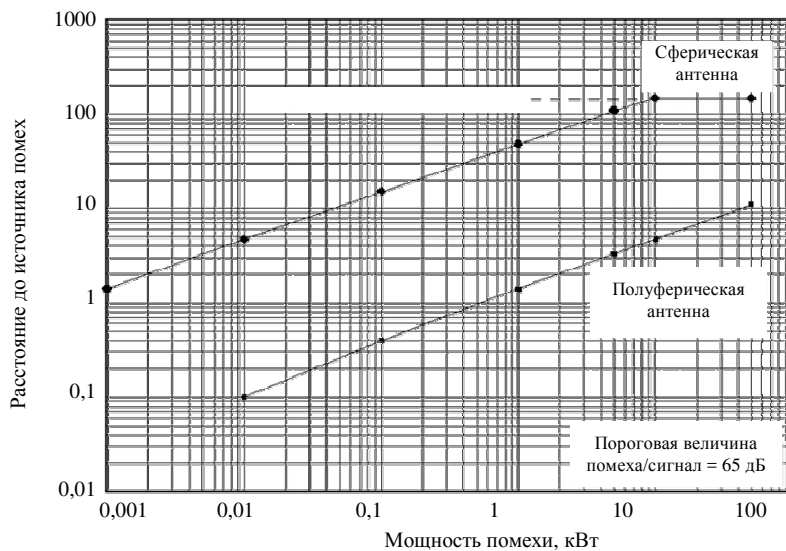


Рис. 5. Графики зависимости расстояния до источника помех, где навигационная GPS/INS система все еще устойчиво работает от типа антенны и мощности помехи [7]

Аналогичные по смыслу графики способности противостоять помеховому сигналу GPS/INS системы в зависимости от мощности генератора до него показаны на рис. 6 [14].

Как отмечается в работах [15–16], навигационная система GPS основана на приеме сигналов, находящихся на высоте 20 000 км, что обуславливает достаточно малую мощность принимаемых сигналов. По этой причине приемники GPS сильно подвержены влиянию различных помех. Если отношение помехи к сигналу превышает 25 дБ, то GPS не способен принять (C/A) код, а при 55 дБ теряется код (P) точности наведения [17–18]. Для повышения помехоустойчивости навигационных систем предложены такие методы, как мультичастотная система (GPS, GALILEO, GLONAS), фильтрации на единой частоте; метод адаптивных антенн путем использования линейки антенн с максимальным усилением в направлении спутников и минимальным усилением в направлении генератора помехи [15, 19–20].

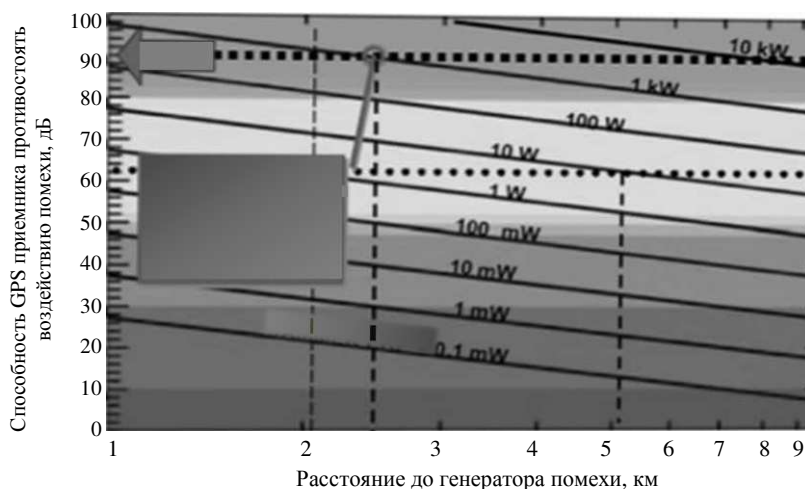


Рис. 6. Графики зависимости способности противостоять воздействию помехи различной мощности при различных расстояниях до генератора помех [14]

Далее в настоящей системе излагаются теоретические основы предлагаемого нового метода повышения помехоустойчивости GPS навигационных систем, основанного на использовании адаптивно управляемых антенн. Воспользуемся формулой Фриса (1), которую запишем как

$$P_R = \frac{A \cdot G_T \cdot G_R}{R^2}, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{P_T \cdot \lambda^2}{16\pi^2} = C_1 \text{const.} \quad (4)$$

Далее рассматриваем ситуацию, когда $G_T = f(R)$, а расстояние R между приемником и генератором помехи является изменяющейся величиной. Введем на рассмотрение интегральный показатель:

$$R\chi_1 = \int_0^{R_M} P_R dR = \int_0^{R_M} \frac{A \cdot G_T \cdot G_R}{R^2} dR, \quad (5)$$

где R_M – максимальная длина трассы.

Физический смысл показателя χ заключается в следующем: допустим, имеется двигающийся объект, оснащенный GPS/INS навигационной системой, и неподвижный генератор помех, установленный у цели, которую должен достичь двигающийся объект (например, управляемая авиабомба). В выражении (5) R является расстоянием, определяемым как $R = R_o - R_x$; где R_o – исходное расстояние между целью (а следовательно, генератором помех) и двигающимся объектом; R_x – текущее расстояние между ними.

Считается, что показатель G_R подлежит управлению по R , при этом закон управления G_T не известен, однако может быть обнаружен и вычислен по мере приближения объекта к цели. Рассматриваются два варианта адаптивного изменения G_R в зависимости от G_T :

$$1) G_R = G_T, \quad (6)$$

$$2) G_R = G_1 - G_T, G_1 = \text{const}. \quad (7)$$

Далее предполагаем, что целью генератора помех является создание максимально эффективных мешающих сигналов в пределах энерговооруженности соответствующего генератора. Так как генерация помех осуществляется во всем диапазоне изменения R от нуля до R_M в пределах ограниченного энергозапаса для вариации коэффициента усиления антенны, то разумно определить второй интегральный показатель:

$$\chi_1 = \int_0^{R_M} G_T(R) dR = C_2, \quad (8)$$

где $C_2 = \text{const}$.

С учетом выражений (5) и (8) составим уравнение безусловной вариационной оптимизации:

$$\chi_1 = \chi_1 + \lambda \cdot \chi_2 = \int_0^{R_M} \frac{A \cdot G_T(R) \cdot G_R(R)}{R^2} dR + \lambda \left[\int_0^{R_M} G_T(R) dR - C_2 \right]. \quad (9)$$

Требуется выбрать одно из выражений (6) и (7), такое, при котором χ_3 достиг бы минимального значения. Согласно уравнению Эйлера-Лагранжа оптимальное выражение $G_R(R)$ должно удовлетворить условию:

$$\frac{d\left\{\frac{A \cdot G_T(R) \cdot G_R(R)}{R^2} + \lambda \cdot G_T(R)\right\}}{dG_T(R)} = 0. \quad (10)$$

Из условия (10) с учетом выражения (6) получим:

$$\frac{2AG_T(R)}{R^2} + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$G_T(R) = \frac{-\lambda \cdot R^2}{-2A}. \quad (12)$$

С учетом выражений (8) и (12) получим:

$$\chi_2 = -\int_0^{R_m} \frac{\lambda \cdot R^2}{2A} dR = \frac{-\lambda \cdot R_m^3}{6A} = C_2. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим:

$$\lambda = -\frac{6AC_2}{R_m^3}. \quad (14)$$

Из выражений (11) и (14) получим:

$$\frac{2A \cdot G_T(R)}{R^2} = \frac{6A \cdot C_2}{R_m^3}. \quad (15)$$

Из выражения (15) окончательно получаем:

$$G_T(R) = \frac{3C_2 \cdot R^2}{R_m^3}. \quad (16)$$

Таким образом, при условии (16) целевой функционал (9) достигает экстремума. Для проверки типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта (9) по $G_T(R)$ и убедиться, что она положительна, т.е. экстремум является минимумом.

Теперь исследуем экстремум функционала (9) с учетом условия (7). С учетом (7) функционал (9) имеет следующий вид:

$$\chi_3 = \int_0^{R_m} \frac{A \cdot G_T(R) \cdot [C_1 - G_T(R)]}{R^2} dR + \lambda \left[\int_0^{R_m} G_T(R) dR - C_2 \right]. \quad (17)$$

Согласно условию Эйлера–Лагранжа функционал (17) достигает экстремума при функции $G_T(R)$, удовлетворяющей условию:

$$\frac{d \left\{ \frac{A \cdot G_T(R) [C_1 - G_T(R)]}{R^2} + \lambda \cdot G_T(R) \right\}}{dG_T(R)} = 0. \quad (18)$$

Из условия (18) получим:

$$\frac{AC_1 - 2AG_T(R)}{R^2} + \lambda = 0. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим:

$$G_T(R) = \frac{\lambda \cdot R^2 + AC_1}{2A}. \quad (20)$$

С учетом выражений (8) и (20) получим:

$$\int_0^{R_m} \left[\frac{\lambda R^2 + AC_1}{2A} \right] dR = C_2. \quad (21)$$

Из выражения (21) находим:

$$\lambda = \frac{\left(C_2 - \frac{C_1}{2} R_m \right) \cdot 6A}{R_m^3}. \quad (22)$$

Из выражений (19) и (22) получим:

$$\frac{AC_1 - 2A \cdot G_T(R)}{R^2} = \frac{\left(\frac{C_1 \cdot R_m}{2} - C_2 \right) \cdot 6A}{R_m^3}. \quad (23)$$

Из выражения (23) получим:

$$G_T(R) = \frac{C_1}{2} - \frac{3R^2}{R_m^3} \left(\frac{C_1 R_m}{2} - C_2 \right). \quad (24)$$

Таким образом, при (24) целевой функционал (17) достигает экстремума. Для определения типа экстремума достаточно вычислить вторую производную интегранта в (17) и убедиться, что она имеет отрицательный знак, т.е. целевой функционал достигает максимума.

С учетом вышеизложенного ниже предлагается метод повышения помехоустойчивости систем со встроенной GPS навигационной системой. Согласно предлагаемому методу защищаемая от помех система, оснащенная GPS-системой навигации, снабжается двумя антеннами, усиления которых определяются как:

$$G_{R_1}(R) = G_R(R), \tag{25}$$

$$G_{R_2}(R) = C_1 - G_R(R). \tag{26}$$

При этом антенна с усилением G_{R_2} предназначена для совместной работы с антенной генератора помехи. Целью такой совместной работы является адаптивная перестройка $G_{R_2}(R)$ таким образом, чтобы достичь максимума целевого функционала

$$\chi_4 = \int_0^{R_m} \frac{P_T \cdot G_{R_2}(R) \cdot G_T(R) \cdot \lambda^2}{(\pi R)^2} dR + \left[\int_0^{R_m} G_T(R) dR - C_2 \right] \tag{27}$$

Максимум функционала (27) достигается путем адаптивного изменения $G_{R_2}(R)$, исследуя динамику C_2 временного изменения $G_T(R)$ и обеспечивая инверсную динамику изменения $G_{R_2}(R)$.

Как было показано выше, в этом случае влияние генератора помех на антенну с усилением $G_{R_2}(R)$ будет максимальным, а на антенну с усилением $G_{R_1}(R)$ будет минимальным. Блок-схема алгоритма реализации предполагаемого метода показана на рис. 7.

Следует отметить, что на первый взгляд алгоритм, показанный на рис. 7, имеет некоторую избыточность, так как вроде можно сократить антенну $G_{R_2}(R)$ и осуществить адаптивное изменение $G_{R_1}(R)$, достигая минимума влияния помехи на антенну $G_{R_1}(R)$. Однако реализация предлагаемого метода с контролем минимума величины соответствующего функционала при достаточно низком сигнале по уровню чревата существенным ослаблением всего полезного эффекта метода.

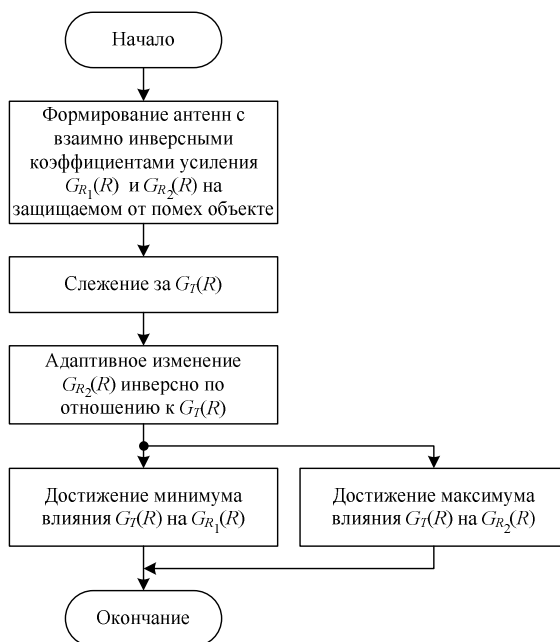


Рис. 7. Блок-схема алгоритма предполагаемого метода ослабления влияния сигнала помехи на работу устройства GPS-навигации

Что касается достоверности ограничения (8), налагаемого на коэффициент усиления антенны генератора помехи, графическая интерпретация этого условия, показанная на рис. 8, позволяет интерпретировать условие (8) в виде трех стратегий организации разнопомехового воздействия:

- следует генерировать максимальную помеху в начале цикла отслеживания движущегося объекта (например, управляемой авиабомбы) при максимальном расстоянии между объектом и генератором помехи (кривая 1, см. рис. 8);
- следует генерировать максимальную помеху в середине цикла отслеживания движущегося объекта при среднем расстоянии между объектом и генератором помехи (кривая 2 на рис. 8);
- следует генерировать максимальную помеху в конце отслеживания объекта при минимально возможном расстоянии между объектом и генератором (кривая 3, см. рис. 8).

Таким образом, предлагаемый метод в некотором смысле имеет вероятностный характер и предполагает равные вероятности выбора вышеуказанных стратегий со стороны пользователя генератора помех.

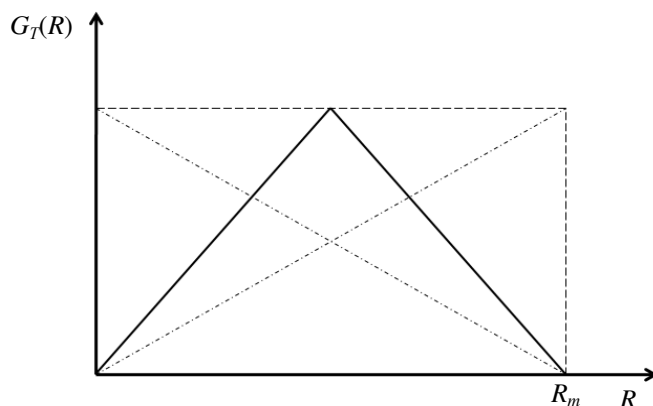


Рис. 8. Возможные кривые изменения $G_T(R)$ на дистанции $0 - R_m$ в соответствии с принятой стратегией создания помехового сигнала

Сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. На основе исследования введенного показателя, представляющего собой интегрированное по пройденной объектом трассе выражение формулы Фриса с учетом неподвижности позиции генератора помехи и направленности объекта в сторону цели, снабженной генератором помехи, а также возможных стратегий изменения мощности помехового сигнала по мере передвижения объекта по трассе показан экстремальный характер этого показателя при достижении прямой или инверсной идентичности коэффициентов усиления антенн объекта и генератора помехи. При этом обнаружено, что при прямой идентичности вновь введенный показатель достигает минимума, а при инверсной идентичности – максимума.

2. На основе экстремальных свойств вновь введенного показателя разработаны метод и алгоритм ослабления влияния помехового сигнала на работу GPS навигационной системы различных технических устройств.

Библиографический список

1. The Friis Equation. RF & Microwave Knowledge Base. – URL: <https://www.markimicrowave.com/blog/engineering/resources/rf-and-microwave-knowledge-base/>

2. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F. GPS-dependent systems: Vulnerabilities to Electromagnetic Attacks // *Journal of Aerospace Technology Management*. – 2016. – Vol. 8, № 4. – P. 423–430.

3. Lakshmi S., Prasad N. GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle // *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*. – 2012. – 1(2). – P. 55–59.

4. Schmidt G.T. INS/GPS Technology Trends. RTO-EN-SET-116. – 2011. – P. 1–24. – URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a581015.pdf>

5. Military technology. Modern satellite navigation aided weapons. *Defence Today*. – URL: <https://www.ausairpower.net/SP/DT-GPS-Weps-Mar-2010.pdf>

6. GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guide missiles / E.J. Ohlmeyer, Th.R. Pepitone, B.L. Miller, D.S. Malyevac, J.E. Bibel, A.G. Evans. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/252397780>

7. GPS-aided navigation system requirements smart munitions and guided missiles / E.J. Ohlmeyer, Th.R. Pepitone, B.L. Miller, D.S. Malyevac, J.E. Bibel, A.G. Evans. – URL: <ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/jacques/CursoNaveg/ohlmeyer.pdf>

8. A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation / D. Gustafson [et. al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. – August 2009. – Vol. 3, № 4. – P. 627–638.

9. Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications / S. Daneshmand, N. Sokhandan, M. Zaeri-Amirani, G. Lachapelle // *Sensors*, 2014. – Vol. 14. – № 6. – P. 9669–9691.

10. Susceptibility of GPS – dependent Complex Systems to Spoofing / L.A. Faria, C.A.M. Silvestre, M.A.F. Correia, N.A. Roso // *Journal of Aerospace Technology Management*. – 2018. – Vol. 10. DOI: 10.5028/jatm.V.10.839

11. Dimc F., Bazec M. An experimental evaluation of low-cost GNSS ganning sensors // *Navigation Journal of the Institute of Navigation*. – 2017. – Vol. 64. – № 1. – P. 93–109.

12. Schmidt G.T., Philips R.E. INS/GPS integration Architecture Performance Comparisons. RTO-EN-SET-116. – 2011.

13. Betz J.W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of C/N_0 : Theory // *Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. – Long Beach, CA. – January 2001. – P. 817–828.

14. McCall G.H. GPS vulnerability: Options and Alternatives. – URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a266083.pdf>
15. GPS Carrier-to-Noise density. – URL: <http://www.northwood-labs.com/AN101.pdf>.
16. Interference Supression in a GPS receiver with 4 element Array design and implementation of beamforming algorithms / O.C. Dabak, F. Fradem, T. Sonmer, L. Alatan, S. Senger Koc, A.S. Havelsan. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interference-suppression-in-a-GPS-receiver-with-4-Dabak-Erdem/1d7978369587ecee9e0a53a70caa2582e9a23942>
17. Sh.Sh. Jan, Ch.Ch. Sun. Signal existence verification (SEV) for GPS low received power signal detection using the time-frequency approach // Sensors. – 2010. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 4717–4738.
18. Bamford William, Winternitz Luke, Hay Curtis. GPS World, Innovation. Autonomous navigation at high Earth orbits. – URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060012296>
19. Ruiz J.I., Frey Ch.H. Geosynchronous satellite use of GPS // ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division; 13–16 September, 2005, – Long Beach, Ca. – P. 1227–1232.
20. Hauschild Andre, Markgraf Markus, Montenbruck Oliver. The navigation and occultation experiment. GPS receiver performance on board a LEO satellite // Inside GNSS. – July/August 2014. – P. 49–58. – URL: www.insidegnss.com

References

1. The Friis Equation. RF & Microwave Knowledge Base, available at: <https://www.markimicrowave.com/blog/engineering/resources/rf-and-microwave-knowledge-base/>
2. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F. GPS - dependent systems: Vulnerabilities to Electromagnetic Attacks. *Journal of Aerospace Technology Management*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 423-430.
3. Lakshmi S., Prasad N. GPS Receiver Protection Requirement for Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 2012, 1(2), pp. 55-59.
4. Schmidt G.T. INS/GPS Technology Trends. RTO-EN-SET-116, 2011, pp. 1-24, available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a581015.pdf>
5. Military technology. Modern satellite navigation aided weapons. Defence Today, available at: <https://www.ausairpower.net/SP/DT-GPS-Weps-Mar-2010.pdf>

6. Ohlmeyer E.J., Pepitone Th.R., Miller B.L., Malyevac D.S., Bibel J.E., Evans A.G. GPS-aided navigation system requirements for smart munitions and guide missiles, available at: <https://www.researchgate.net/publication/252397780>

7. Ohlmeyer E.J., Pepitone Th.R., Miller B.L., Malyevac D.S., Bibel J.E., Evans A.G. GPS-aided navigation system requirements smart munitions and guided missiles, available at: <ftp://labattmot.ele.ita.br/ele/jacques/CursoNaveg/ohlmeyer.pdf>

8. Gustafson D. et. al. A Nonlinear Code Tracking Filter for GPS-Based Navigation. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. August 2009, vol. 3, no. 4, pp. 627-638.

9. Daneshmand S., Sokhandan N., Zaeri-Amirani M., Lachapelle G. Precise Calibration of a GNSS Antenna Array for Adaptive Beamforming Applications. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 9669-9691.

10. Faria L.A., Silvestre C.A.M., Correia M.A.F., Roso N.A. Susceptibility of GPS – dependent Complex Systems to Spoofing. *Journal of Aerospace Technology Management*, 2018, vol. 10. DOI: 10.5028/jatm.V.10.839

11. Dimc F., Bazec M. An experimental evaluation of low-cost GNSS jamming sensors. *Navigation Journal of the Institute of Navigation*, 2017, vol. 64, no. 1, pp. 93-109.

12. Schmidt G.T., Philips R.E. INS/GPS integration Architecture Performance Comparisons. RTO-EN-SET-116, 2011.

13. Betz J.W. Effect of Partial-Band Interference on Receiver Estimation of C/N_0 : Theory. *Proceedings of the National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Long Beach, CA. January 2001, pp. 817-828.

14. McCall G.H. GPS vulnerability: Options and Alternatives, available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a266083.pdf>

15. GPS Carrier-to-Noise density, available at: <http://www.northwoodlabs.com/AN101.pdf>.

16. Dabak O.C., Fradem F., Sonmer T., Alatan L., Senger Koc S., Havelsan A.S. Interference Suppression in a GPS receiver with 4 element Array design and implementation of beamforming algorithms, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Interference-suppression-in-a-GPS-receiver-with-4-Dabak-Erdem/1d7978369587ecee9e0a53a70caa2582e9a23942>

17. Sh.Sh. Jan, Ch.Ch. Sun. Signal existence verification (SEV) for GPS low received power signal detection using the time-frequency approach. *Sensors*, 2010, vol. 10, iss. 5, pp. 4717-4738.

18. William Bamford, Luke Winternitz, Curtis Hay. GPS World, Innovation. Autonomous navigation at high Earth orbits, available at: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060012296>

19. Ruiz J.I., Frey Ch.H. Geosynchronous satellite use of GPS. *ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 13-16 September, 2005, Long Beach, Ca, pp. 1227-1232.

20. Hauschild Andre, Markgraf Markus, Montenbruck Oliver. The navigation and occultation experiment. GPS receiver performance on board a LEO satellite. *Inside GNSS*. July/August 2014, pp. 49-58, available at: www.insidegnss.com.

Сведения об авторах

Абдуллаев Рауф Нусратоглы (Баку, Азербайджанская Республика) – кандидат технических наук, заместитель главного инженера НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджанской Республики (AZ1123, Баку, ул. Г. Мамедова, 23, e-mail: rauf-abdulov@yandex.ru).

Асадов Хикмет Гамидоглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, начальник отдела Национального аэрокосмического агентства, НИИ аэрокосмической информатики (AZ1145, Баку, ул. С.С. Ахундова, 9, e-mail: asadzade@rambler.ru).

About the authors

Abdullayev Rauf Nusratoglu (Baku, Azerbaijan Republic) is a Ph.D. in Technical Sciences, Deputy chief engineer, Research Institute of Ministry of Defence Industry of Azerbaijan Republic (AZ1123, Baku, 23, G. Mamedov str., e-mail: rauf-abdulov@yandex.ru).

Asadov Hikmat Hamidoglu (Baku, Azerbaijan Republic) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, National Aerospace Agency, Research Institute of Aerospace Informatics (AZ1145, Baku, 9, S.S. Akhundov str., e-mail: asadzade@rambler.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 621.311.004.12

Г.А. Большанин

Братский государственный университет, Братск, Россия

**СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВОСЬМИПОЛЮСНИКА С ДВУМЯ
ВХОДНЫМИ И ШЕСТЬЮ ВЫХОДНЫМИ ВЫВОДАМИ**

Восьмиполюсники различных исполнений, в том числе и восьмиполюсник с двумя входными и шестью выходными выводами, необходимы для замещения некоторых энергетических объектов. Особенно тогда, когда интерес представляют лишь входные и выходные характеристики электрической энергии. Особенности состояния восьмиполюсника описываются уравнениями различных форм. Для описания состояния восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами в силовой энергетике чаще всего используются уравнения А-формы. Кроме того, используются уравнения В-формы, G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы. Уравнения этих форм представлены в статье. А для реализации этих уравнений необходимо иметь сведения о численных значениях соответствующих коэффициентов. Их можно определить экспериментально, причем достаточно экспериментально определить коэффициенты уравнений какой-либо одной формы. Методика такого определения известна. Коэффициенты уравнений других форм можно определить аналитически. Для этого необходимо иметь представление о количественной связи коэффициентов уравнений различных форм между собой. Выявлению такой связи и посвящена предлагаемая статья. В статье представлена методика выявления таких связей. Выяснено, что за базовые уравнения целесообразно принимать уравнения В-формы. Именно с коэффициентами уравнений В-формы, описывающих количественную связь между выходными и входными характеристиками электрической энергии в пассивном восьмиполюснике с двумя входными и шестью выходными выводами, удобнее всего установить связь коэффициентов уравнений А-формы, G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы, описывающих состояние этого же восьмиполюсника. Представлены формулы, устанавливающие количественную связь между коэффициентами уравнений В-формы и коэффициентами уравнений А-формы, G-формы, H-формы, Y-формы и Z-формы, описывающих состояние электроэнергетического объекта, замещенного пассивным восьмиполюсником с двумя входными и шестью выходными выводами. Представленная методика формирования количественной связи между коэффициентами уравнений различных форм может быть распространена и на другие типы многополюсников. Такая связь существенно увеличит возможности использования многополюсников в инженерной практике.

Ключевые слова: уравнения, коэффициенты, напряжения, токи, А-форма, В-форма, G-форма, H-форма, Y-форма, Z-форма.

G.A. Bolshanin

Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation

CONNECTION OF THE OCCUPATIONAL COEFFICIENTS WITH TWO INPUTS AND SIX OUTPUTS

Eight-port networks of various versions, including an eight-port network with two input and six output terminals, are necessary to replace some energy facilities. Especially when only the input and output characteristics of electrical energy are of interest. Features of the state of the eight-port network are described by equations of various forms. To describe the state of an eight-port network with two input and six output outputs in power engineering, the A-form equations are most often used. In addition, the equations of the B-form, G-form, H-form, Y-form and Z-form are used. The equations of these forms are presented in the article. And for the implementation of these equations it is necessary to have information about the numerical values of the corresponding coefficients. They can be determined experimentally. It is enough to experimentally determine the coefficients of the equations of any one form. The method of this definition is known. The coefficients of equations of other forms can be determined analytically. For this, it is necessary to have an idea of the quantitative relation of the coefficients of equations of various forms among themselves. The proposed article is dedicated to the identification of such a connection. The article presents a method for identifying such links. It was found that it is advisable to take the B-form equations as basic equations. It is with the coefficients of the B-form equations that describe the quantitative relationship between the output and input characteristics of electrical energy in a passive eight-terminal network with two input and six output outputs. It is most convenient to establish a connection between the coefficients of the A-form, G-form, H-form, Y-form, and Z-forms describing the state of the same eight-port network. Formulas are established that establish a quantitative relationship between the coefficients of the B-form equations and the coefficients of the A-form, G-form, H-form, Y-form and Z-form equations describing the state of an electric power object, replaced by a passive eight-pole network with two input and six output pins. The presented method of forming a quantitative relationship between the coefficients of equations of various forms can be extended to other types of multipoles. Such a connection will significantly increase the possibility of using multipoles in engineering practice.

Keywords: equations, coefficients, voltages, currents, A-form, B-form, G-form, H-form, Y-form, Z-form.

Идея замещения электротехнических объектов многополюсниками возникла давно [1, 2]. Но до недавнего времени основное внимание уделялось теории четырехполюсников. Теория многополюсников рассматривалась в основном применительно к устройствам связи [3–8]. Позже возможность применения теории многополюсников стали рассматривать при синтезе и анализе электрических цепей [9, 10], в силовой энергетике [11–15], в электронике [16], в системах автоматического управления промышленными технологиями [17–19] и даже в механике [20, 21]. Анализ состояния многополюсников посвящено множество научно-исследовательских разработок [22–25].

Восьмиполюсником следует называть часть электрической цепи, электротехнического устройства или электроэнергетической системы с восемью выводами. Эти выводы могут служить либо для входа (вход-

ные), либо для выхода (выходные) электрических сигналов. Причем количество входных и выходных выводов может быть не менее двух и не более шести. В данном случае интерес вызывает восьмиполосник с двумя входными и шестью выходными выводами (рис. 1).

Состояние энергетического объекта, замещаемого таким восьмиполосником, может быть описано уравнениями различных форм. Состояние восьмиполосника с двумя входными и шестью выходными выводами в силовой электроэнергетике принято описывать уравнениями А-формы. Но это мнение может оказаться субъективным. В ряде отраслей электротехники и электроэнергетики может оказаться целесообразным использование уравнений иных форм: уравнения В-формы, Y-формы, H-формы, G-формы Z-формы. В уравнениях каждой формы используются свои специфические коэффициенты. Их численные значения можно определить экспериментально по методике, аналогичной изложенной в [26].

Получается, что при использовании для анализа состояния одного и того же восьмиполосника уравнений различных форм необходимо неоднократно выполнить серию экспериментов с последующей аналитической обработкой полученных таким образом данных. Это достаточно громоздкая процедура. Гораздо проще было бы установить количественную связь коэффициентов одной формы с коэффициентами уравнений иных форм. Этому и посвящена предлагаемая статья.

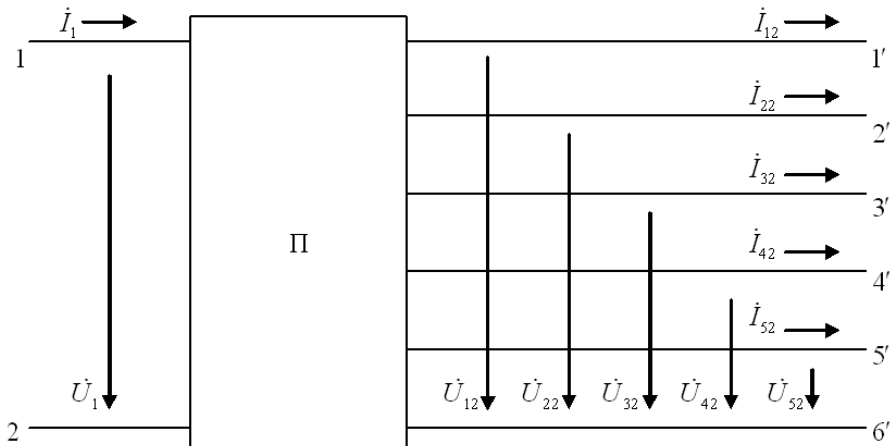


Рис. 1. Пассивный восьмиполосник с двумя входными и шестью выходными выводами

В [26] представлены возможные формы уравнений, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами. Там же рекомендовано преимущественное использование в областях силовой электроэнергетики уравнений А-формы:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B & N & O & P & Q & R & S & V & W \\ C & D & E & F & G & H & J & K & L & M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{U}_{52} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{U}_{52} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, N, O, P, R, S, V$ и W – коэффициенты уравнений А-формы, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Но это не более чем рекомендация. В отдельных областях энергетики целесообразно использование для описания состояния анализируемого восьмиполюсника уравнений иных форм:

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{12} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{U}_{52} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \\ B_{41} & B_{42} \\ B_{51} & B_{52} \\ B_{61} & B_{62} \\ B_{71} & B_{72} \\ B_{81} & B_{82} \\ B_{91} & B_{92} \\ B_{101} & B_{102} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \end{pmatrix} = \mathbf{B} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{U}_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} & G_{46} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & G_{55} & G_{56} \\ G_{61} & G_{62} & G_{63} & G_{64} & G_{65} & G_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \mathbf{G} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{U}_{52} \end{pmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{U}_{52} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{U}_{52} \end{pmatrix} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}, \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{12} \\ \dot{U}_{22} \\ \dot{U}_{32} \\ \dot{U}_{42} \\ \dot{U}_{52} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{32} \\ \dot{I}_{42} \\ \dot{I}_{52} \end{pmatrix} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} = \mathbf{U}, \quad (6)$$

где $B_{11}, B_{12}, B_{21}, B_{22}, B_{31}, B_{32}, B_{41}, B_{42}, B_{51}, B_{52}, B_{61}, B_{62}, B_{71}, B_{72}, B_{81}, B_{82}, B_{91}, B_{92}, B_{101}$ и B_{102} – коэффициенты уравнений В-формы; $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{15}, G_{16}, G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{24}, G_{25}, G_{26}, G_{31}, G_{32}, G_{33}, G_{34}, G_{35}, G_{36}, G_{41}, G_{42}, G_{43}, G_{44}, G_{45}, G_{46}, G_{51}, G_{52}, G_{53}, G_{54}, G_{55}, G_{56}, G_{61}, G_{62}, G_{63}, G_{64}, G_{65}$ и G_{66} – коэффициенты уравнений

G-формы; $H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{14}, H_{15}, H_{16}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{24}, H_{25}, H_{26}, H_{31}, H_{32}, H_{33}, H_{34}, H_{35}, H_{36}, H_{41}, H_{42}, H_{43}, H_{44}, H_{45}, H_{46}, H_{51}, H_{52}, H_{53}, H_{54}, H_{55}, H_{56}, H_{61}, H_{62}, H_{63}, H_{64}, H_{65}$ и H_{66} – коэффициенты уравнений H-формы; $Y_{11}, Y_{12}, Y_{13}, Y_{14}, Y_{15}, Y_{16}, Y_{21}, Y_{22}, Y_{23}, Y_{24}, Y_{25}, Y_{26}, Y_{31}, Y_{32}, Y_{33}, Y_{34}, Y_{35}, Y_{36}, Y_{41}, Y_{42}, Y_{43}, Y_{44}, Y_{45}, Y_{46}, Y_{51}, Y_{52}, Y_{53}, Y_{54}, Y_{55}, Y_{56}, Y_{61}, Y_{62}, Y_{63}, Y_{64}, Y_{65}$ и Y_{66} – коэффициенты уравнений Y-формы; $Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{15}, Z_{16}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}, Z_{24}, Z_{25}, Z_{26}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{33}, Z_{34}, Z_{35}, Z_{36}, Z_{41}, Z_{42}, Z_{43}, Z_{44}, Z_{45}, Z_{46}, Z_{51}, Z_{52}, Z_{53}, Z_{54}, Z_{55}, Z_{56}, Z_{61}, Z_{62}, Z_{63}, Z_{64}, Z_{65}$ и Z_{66} – коэффициенты уравнений Z-формы, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Но для этого нужно иметь сведения о численных значениях коэффициентов этих уравнений.

В [26, 27] предложена методика экспериментального определения численных значений коэффициентов уравнений A-формы. На первый взгляд этих сведений может быть достаточно для определения численных значений коэффициентов уравнений иных форм.

Для выяснения связи коэффициентов уравнений различных форм с коэффициентами уравнений A-формы необходимо уравнения A-формы преобразовать так, чтобы они приобрели структуру уравнений той или иной формы, т.е. уравнения A-формы должны приобрести структуру уравнений B-формы, G-формы, H-формы, Y-формы или Z-формы. Но вряд ли это возможно. Дело в том, что состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами описывается двумя уравнениями A-формы (1), десятью уравнениями B-формы, шестью уравнениями G-формы, шестью уравнениями H-формы, шестью уравнениями Y-формы или шестью уравнениями Z-формы. Но нельзя из двух уравнений A-формы получить шесть уравнений G-формы, шесть уравнений H-формы, шесть уравнений Y-формы, шесть уравнений Z-формы и тем более десять уравнений B-формы.

Но если за базовые принять десять уравнений B-формы, то поставленная задача формирования связи уравнений различных форм становится выполнимой. Десять уравнений B-формы можно преобразовать так, чтобы они приобрели структуру двух уравнений A-формы, шести

уравнений G-формы, шести уравнений H-формы, шести уравнений Y-формы или шести уравнений Z-формы. Но для этого необходимо заблаговременно иметь сведения о численных значениях коэффициентов уравнений В-формы. А их в данном случае можно определить только экспериментально. Методика такого определения представлена в [28].

Для формирования количественной связи уравнений В-формы с уравнениями А-формы нужно уравнения В-формы (2) преобразовать так, чтобы они приобрели структуру уравнений А-формы (1). Вариантов такого преобразования множество. Здесь предлагаются лишь пять возможных вариантов.

Первый вариант:

$$\begin{cases} \dot{U}_{11} = \frac{B_{62}}{B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61}} \dot{U}_{12} + \frac{B_{12}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}} \dot{I}_{12}, \\ \dot{I}_{11} = \frac{B_{61}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}} \dot{U}_{12} + \frac{B_{11}}{B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61}} \dot{I}_{12}. \end{cases}$$

Второй вариант:

$$\begin{cases} \dot{U}_{11} = \frac{B_{72}}{B_{21}B_{72} - B_{22}B_{71}} \dot{U}_{22} + \frac{B_{22}}{B_{22}B_{71} - B_{21}B_{72}} \dot{I}_{22}, \\ \dot{I}_{11} = \frac{B_{71}}{B_{22}B_{71} - B_{21}B_{72}} \dot{U}_{22} + \frac{B_{21}}{B_{21}B_{72} - B_{22}B_{71}} \dot{I}_{22}. \end{cases}$$

Третий вариант:

$$\begin{cases} \dot{U}_{11} = \frac{B_{82}}{B_{31}B_{82} - B_{32}B_{81}} \dot{U}_{32} + \frac{B_{32}}{B_{32}B_{81} - B_{31}B_{82}} \dot{I}_{32}, \\ \dot{I}_{11} = \frac{B_{81}}{B_{32}B_{81} - B_{31}B_{82}} \dot{U}_{32} + \frac{B_{31}}{B_{31}B_{82} - B_{32}B_{81}} \dot{I}_{32}. \end{cases}$$

Четвертый вариант:

$$\begin{cases} \dot{U}_{11} = \frac{B_{92}}{B_{41}B_{92} - B_{42}B_{91}} \dot{U}_{42} + \frac{B_{42}}{B_{42}B_{91} - B_{41}B_{92}} \dot{I}_{42}, \\ \dot{I}_{11} = \frac{B_{91}}{B_{42}B_{91} - B_{41}B_{92}} \dot{U}_{42} + \frac{B_{41}}{B_{41}B_{92} - B_{42}B_{91}} \dot{I}_{42}. \end{cases}$$

Пятый вариант:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{11} &= \frac{B_{102}}{B_{51}B_{102} - B_{52}B_{101}} \dot{U}_{52} + \frac{B_{52}}{B_{52}B_{101} - B_{51}B_{102}} \dot{i}_{52}, \\ \dot{i}_{11} &= \frac{B_{101}}{B_{52}B_{101} - B_{51}B_{102}} \dot{U}_{52} + \frac{B_{51}}{B_{51}B_{102} - B_{52}B_{101}} \dot{i}_{52}. \end{aligned}$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (1) позволит сформировать равенства для вычисления коэффициентов уравнений А-формы через коэффициенты уравнений В-формы.

Первый вариант:

$$\begin{aligned} A &= \frac{B_{62}}{B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61}}; \quad B = \frac{B_{12}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}}; \quad C = \frac{B_{61}}{B_{12}B_{61} - B_{11}B_{62}}; \\ D &= \frac{B_{61}}{B_{11}B_{62} - B_{12}B_{61}}; \end{aligned}$$

$$E = F = G = H = J = K = L = M = N = O = P = Q = R = S = V = W = 0.$$

Второй вариант:

$$A = B = C = D = G = H = J = K = L = M = P = Q = R = S = V = W = 0;$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{B_{71}}{B_{22}B_{71} - B_{21}B_{72}}; \quad F = \frac{B_{21}}{B_{21}B_{72} - B_{22}B_{71}}; \\ N &= \frac{B_{72}}{B_{21}B_{72} - B_{22}B_{71}}; \quad O = \frac{B_{22}}{B_{22}B_{71} - B_{21}B_{72}}. \end{aligned}$$

Третий вариант:

$$A = B = C = D = E = F = J = K = L = M = N = O = R = S = V = W = 0;$$

$$\begin{aligned} G &= \frac{B_{81}}{B_{32}B_{81} - B_{31}B_{82}}; \quad H = \frac{B_{31}}{B_{31}B_{82} - B_{32}B_{81}}; \\ P &= \frac{B_{82}}{B_{31}B_{82} - B_{32}B_{81}}; \quad Q = \frac{B_{32}}{B_{32}B_{81} - B_{31}B_{82}}. \end{aligned}$$

Четвертый вариант:

$$A = B = C = D = E = F = G = H = L = M = N = O = P = Q = V = W = 0;$$

$$J = \frac{B_{91}}{B_{42}B_{91} - B_{41}B_{92}}; \quad K = \frac{B_{41}}{B_{41}B_{92} - B_{42}B_{91}};$$

$$R = \frac{B_{92}}{B_{41}B_{92} - B_{42}B_{91}}; S = \frac{B_{42}}{B_{42}B_{91} - B_{41}B_{92}}.$$

Пятый вариант:

$$A=B=C=D=E=F=G=H=J=K=N=O=P=Q=R=S=0;$$

$$L = \frac{B_{101}}{B_{52}B_{101} - B_{51}B_{102}}; M = \frac{B_{51}}{B_{51}B_{102} - B_{52}B_{101}};$$

$$V = \frac{B_{102}}{B_{51}B_{102} - B_{52}B_{101}}; W = \frac{B_{52}}{B_{52}B_{101} - B_{51}B_{102}}.$$

Именно эти равенства устанавливают связь уравнений В-формы с уравнениями А-формы применительно к восьмиполюснику с двумя входными и шестью выходными выводами.

Для формирования связи уравнений В-формы с уравнениями G-формы нужно уравнения В-формы преобразовать так, чтобы они приобрели структуру уравнений G-формы (3):

$$\begin{aligned} \dot{i}_{11} &= -\frac{B_{61}}{B_{62}}\dot{U}_{11} + \frac{1}{B_{62}}\dot{i}_{12}; \dot{U}_{12} = \left(B_{11} - \frac{B_{12}B_{61}}{B_{62}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{12}}{B_{62}}\dot{i}_{12}; \\ \dot{U}_{22} &= \left(B_{21} - \frac{B_{22}B_{71}}{B_{72}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{22}}{B_{72}}\dot{i}_{22}; \dot{U}_{32} = \left(B_{31} - \frac{B_{32}B_{81}}{B_{82}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{32}}{B_{82}}\dot{i}_{32}; \\ \dot{U}_{42} &= \left(B_{41} - \frac{B_{42}B_{91}}{B_{92}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{42}}{B_{92}}\dot{i}_{42}; \dot{U}_{52} = \left(B_{51} - \frac{B_{52}B_{101}}{B_{102}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{52}}{B_{102}}\dot{i}_{52}. \end{aligned}$$

Это лишь один из вариантов преобразования уравнений (2).

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (3) позволит формирование равенств для вычисления коэффициентов уравнений G-формы, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами, через коэффициенты уравнений В-формы, описывающих состояние этого же восьмиполюсника:

$$G_{11} = -\frac{B_{61}}{B_{62}}; G_{12} = \frac{1}{B_{62}};$$

$$\begin{aligned} G_{13} &= G_{14} = G_{15} = G_{16} = G_{23} = G_{24} = G_{25} = G_{26} = G_{32} = G_{34} = G_{35} = G_{36} = \\ &= G_{42} = G_{43} = G_{45} = G_{46} = G_{52} = G_{53} = G_{54} = G_{56} = G_{62} = G_{63} = G_{64} = G_{65} = 0; \end{aligned}$$

$$G_{21} = B_{11} - \frac{B_{12}B_{61}}{B_{62}}; G_{22} = \frac{B_{12}}{B_{62}}; G_{31} = B_{21} - \frac{B_{22}B_{71}}{B_{72}}; G_{33} = \frac{B_{22}}{B_{72}};$$

$$G_{41} = B_{31} - \frac{B_{32}B_{81}}{B_{82}}; G_{44} = \frac{B_{32}}{B_{82}}; G_{51} = B_{41} - \frac{B_{42}B_{91}}{B_{92}}; G_{55} = \frac{B_{42}}{B_{92}};$$

$$G_{61} = B_{51} - \frac{B_{52}B_{101}}{B_{102}}; G_{66} = \frac{B_{52}}{B_{102}}.$$

Эти равенства устанавливают связь уравнений В-формы с уравнениями G-формы. Но это лишь один из возможных вариантов таких равенств.

Связь уравнений той или иной формы устанавливается через их коэффициенты. Для выяснения количественной связи уравнений В-формы с уравнениями H-формы нужно уравнения (2) преобразовать так, чтобы они приобрели структуру уравнений (4):

$$\dot{U}_{11} = -\frac{B_{12}}{B_{11}} \dot{I}_{11} + \frac{1}{B_{11}} \dot{U}_{12}; \dot{I}_{12} = \left(B_{62} - \frac{B_{12}B_{61}}{B_{11}} \right) \dot{I}_{11} + \frac{B_{61}}{B_{11}} \dot{U}_{12};$$

$$\dot{I}_{22} = \left(B_{72} - \frac{B_{22}B_{71}}{B_{21}} \right) \dot{I}_{11} + \frac{B_{71}}{B_{21}} \dot{U}_{22}; \dot{I}_{32} = \left(B_{82} - \frac{B_{32}B_{81}}{B_{31}} \right) \dot{I}_{11} + \frac{B_{81}}{B_{31}} \dot{U}_{32};$$

$$\dot{I}_{42} = \left(B_{92} - \frac{B_{42}B_{91}}{B_{41}} \right) \dot{I}_{11} + \frac{B_{91}}{B_{41}} \dot{U}_{42}; \dot{I}_{52} = \left(B_{102} - \frac{B_{52}B_{101}}{B_{51}} \right) \dot{I}_{11} + \frac{B_{101}}{B_{51}} \dot{U}_{52}.$$

Это лишь один из вариантов преобразования уравнений (2) с этой целью.

В результате сопоставления этих уравнений с уравнениями (4) несложно сформировать равенства для вычисления коэффициентов уравнений H-формы через коэффициенты уравнений В-формы:

$$H_{11} = -\frac{B_{12}}{B_{11}}; H_{12} = \frac{1}{B_{11}};$$

$$H_{13} = H_{14} = H_{15} = H_{16} = H_{23} = H_{24} = H_{25} = H_{26} = H_{32} = H_{34} = H_{35} =$$

$$= H_{36} = H_{42} = H_{43} = H_{45} = H_{46} = H_{52} = H_{53} = H_{54} = H_{56} = H_{62} = H_{63} =$$

$$= H_{64} = H_{65} = 0;$$

$$H_{21} = B_{62} - \frac{B_{12}B_{61}}{B_{11}}; H_{22} = \frac{B_{61}}{B_{11}}; H_{31} = B_{72} - \frac{B_{22}B_{71}}{B_{21}}; H_{33} = \frac{B_{71}}{B_{21}};$$

$$H_{41} = B_{82} - \frac{B_{32}B_{81}}{B_{31}}; H_{44} = \frac{B_{81}}{B_{31}}; H_{51} = B_{92} - \frac{B_{42}B_{91}}{B_{41}}; H_{55} = \frac{B_{91}}{B_{41}};$$

$$H_{61} = B_{102} - \frac{B_{52}B_{101}}{B_{51}}; H_{66} = \frac{B_{101}}{B_{51}}.$$

Для формирования количественной связи уравнений В-формы с уравнениями Y-формы структура этих уравнений (5) должна приобрести структуру уравнений (2) после соответствующих преобразований. Вариантов таких преобразований множества. Вот результаты одного из них:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{I}_{11} = -\frac{B_{11}}{B_{12}}\dot{U}_{11} + \frac{1}{B_{12}}\dot{U}_{12}, \\ \dot{I}_{12} = \left(B_{62} - \frac{B_{11}B_{62}}{B_{12}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{62}}{B_{12}}\dot{U}_{12}, \\ \dot{I}_{22} = \left(B_{71} - \frac{B_{21}B_{72}}{B_{22}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{72}}{B_{22}}\dot{U}_{22}, \\ \dot{I}_{32} = \left(B_{81} - \frac{B_{31}B_{82}}{B_{32}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{82}}{B_{32}}\dot{U}_{32}, \\ \dot{I}_{42} = \left(B_{91} - \frac{B_{41}B_{92}}{B_{42}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{92}}{B_{42}}\dot{U}_{42}, \\ \dot{I}_{52} = \left(B_{101} - \frac{B_{51}B_{102}}{B_{52}} \right)\dot{U}_{11} + \frac{B_{102}}{B_{52}}\dot{U}_{52}. \end{array} \right.$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (5) позволит формирование равенств для вычисления коэффициентов уравнений Y-формы, описывающих восьмиполюсник с двумя входными и шестью выходными выводами.

$$Y_{11} = -\frac{B_{11}}{B_{12}}; Y_{12} = \frac{1}{B_{12}};$$

$$Y_{13} = Y_{14} = Y_{15} = Y_{16} = Y_{23} = Y_{24} = Y_{25} = Y_{26} = Y_{32} = Y_{34} = Y_{35} = Y_{36} = Y_{42} = Y_{43} = \\ = Y_{45} = Y_{46} = Y_{52} = Y_{53} = Y_{54} = Y_{56} = Y_{62} = Y_{63} = Y_{64} = Y_{65} = 0;$$

$$Y_{21} = B_{61} - \frac{B_{11}B_{62}}{B_{12}}; Y_{22} = \frac{B_{62}}{B_{12}}; Y_{31} = B_{71} - \frac{B_{21}B_{72}}{B_{22}}; Y_{33} = \frac{B_{72}}{B_{22}}; Y_{41} = B_{81} - \frac{B_{31}B_{82}}{B_{32}};$$

$$Y_{44} = \frac{B_{82}}{B_{32}}; Y_{51} = B_{91} - \frac{B_{41}B_{92}}{B_{42}}; Y_{55} = \frac{B_{92}}{B_{42}}; Y_{61} = B_{101} - \frac{B_{51}B_{102}}{B_{52}}; Y_{66} = \frac{B_{102}}{B_{52}}.$$

Эти равенства устанавливают связь уравнений В-формы с уравнениями Y-формы для восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

Для формирования связи уравнений В-формы с уравнениями Z-формы нужно уравнения (2) преобразовать так, чтобы оно приобрели структуру уравнений (6):

$$\begin{aligned}\dot{U}_{11} &= -\frac{B_{62}}{B_{61}} \dot{i}_{11} + \frac{1}{B_{61}} \dot{i}_{12}; \quad \dot{U}_{12} = \left(B_{12} - \frac{B_{11}B_{62}}{B_{61}} \right) \dot{i}_{11} + \frac{B_{11}}{B_{61}} \dot{i}_{12}; \\ \dot{U}_{22} &= \left(B_{22} - \frac{B_{21}B_{72}}{B_{71}} \right) \dot{i}_{11} + \frac{B_{21}}{B_{71}} \dot{i}_{22}; \quad \dot{U}_{32} = \left(B_{32} - \frac{B_{31}B_{82}}{B_{81}} \right) \dot{i}_{11} + \frac{B_{31}}{B_{81}} \dot{i}_{32}; \\ \dot{U}_{42} &= \left(B_{42} - \frac{B_{41}B_{92}}{B_{91}} \right) \dot{i}_{11} + \frac{B_{41}}{B_{91}} \dot{i}_{42}; \quad \dot{U}_{52} = \left(B_{52} - \frac{B_{51}B_{102}}{B_{101}} \right) \dot{i}_{11} + \frac{B_{51}}{B_{101}} \dot{i}_{52}.\end{aligned}$$

Сопоставление этих уравнений с уравнениями (6) позволит сформировать равенства для вычисления коэффициентов уравнений Z-формы через коэффициенты уравнений В-формы.

$$\begin{aligned}Z_{11} &= -\frac{B_{61}}{B_{61}}; \quad Z_{12} = \frac{1}{B_{61}}; \\ Z_{13} &= Z_{14} = Z_{15} = Z_{16} = Z_{23} = Z_{24} = Z_{25} = Z_{26} = Z_{32} = Z_{34} = Z_{35} = Z_{36} = Z_{42} = \\ &= Z_{43} = Z_{45} = Z_{46} = Z_{52} = Z_{53} = Z_{54} = Z_{56} = Z_{62} = Z_{63} = Z_{64} = Z_{65} = 0; \\ Z_{21} &= B_{12} - \frac{B_{11}B_{62}}{B_{61}}; \quad Z_{22} = \frac{B_{11}}{B_{61}}; \quad Z_{31} = B_{21} - \frac{B_{21}B_{72}}{B_{71}}; \quad Z_{33} = \frac{B_{21}}{B_{71}}; \\ Z_{41} &= B_{32} - \frac{B_{31}B_{82}}{B_{81}}; \quad Z_{44} = \frac{B_{31}}{B_{81}}; \quad Z_{51} = B_{42} - \frac{B_{41}B_{92}}{B_{91}}; \quad Z_{55} = \frac{B_{41}}{B_{91}}; \\ Z_{61} &= B_{52} - \frac{B_{51}B_{102}}{B_{101}}; \quad Z_{66} = \frac{B_{51}}{B_{101}}.\end{aligned}$$

Так устанавливается связь уравнений В-формы с уравнениями Z-формы. Таким образом, может быть установлена связь между уравнениями любых форм, описывающих состояние восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами.

В результате выполненного исследования установлена количественная связь между коэффициентами уравнений различных форм, описывающих состояние электроэнергетического объекта, замещенного пассивным восьмиполюсником с двумя входными и шестью выходными выводами. Теперь исследователь может не ограничивать себя в выборе уравнений той или иной формы. Но тем не менее процессу исследования должно предшествовать экспериментальное определение коэффициентов уравнений хотя бы одной формы.

Рассмотренные здесь элементы теории восьмиполосников позволяют объективный анализ электротехнического оборудования трехфазного исполнения, а также трехфазных электроэнергетических систем. Развитие теории восьмиполосников открывает новые возможности такого анализа. Например, объективный анализ распределения электрической энергии по участкам электроэнергетических систем, определение параметров линий электропередачи трехпроводного исполнения и т.д.

Разработанные здесь элементы теории восьмиполосников могут быть образцом для формирования теорий десятиполосников, двенадцатиполосников, четырнадцатиполосников, которыми в условиях пониженного качества электрической энергии могут быть замещены, например, трехфазные линии электропередачи четырехпроводного исполнения, трехпроводного исполнения с грозозащитным тросом [22], пятипроводного и шестипроводного (двухцепная ЛЭП) исполнений. Возможна разработка элементов теории многополосников и иных исполнений.

Библиографический список

1. Воронов Р.А. Общая теория четырехполосников и многополосников. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 192 с.
2. Зевеке Г.В. Многополосники. – М.: Изд-во МЭИ, 1971. – 23 с.
3. Попов Н.М., Олин Д.М., Кирилин А.А. Способ передачи сигналов по сельским распределительным сетям 0,38 кВ // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 2. – С. 88–97.
4. Барабанов Е.А., Мальцева И.С., Барабанов И.О. Алгоритм параллельной обработки данных в оптических сетях // Научный вестник НГТУ. – 2004. – Т. 56. – № 3. – С. 88–95.
5. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
6. Скобелев С.П. Фазированные антенные решетки с секторными диаграммами направленности. – М.: Физматлит, 2016. – 320 с.
7. Фаняев И.А., Кудин В.П. Распределительная матрица для питания восьмизлементной антенной решетки // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 4. – С. 52–57.
8. Шауэрман А.А. Исследование зависимости неопределенности измерения комплексного коэффициента отражения оконечных устройств от параметров измерительного преобразователя // Вестник СибГУТИ. – 2013. – № 3. – С. 20–28.

9. Салимоненко Д.А. Применение методов линейного программирования для определения параметров электрических цепей. Ч. 1 // Вестник Башкир. ун-та. – 2015. – Т. 20. – № 4. – С. 1155–1163.

10. Селиванов В.Н. Исследование программ расчета электромагнитных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. – 2009. – Т. 12. – № 1. – С. 107–112.

11. Куликов А.Л., Лукичева И.А. Определение места и повреждения линии электропередачи по мгновенным значениям осциллограмм аварийных событий // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 16–21.

12. Китаев А.В., Агбомассу В.Л., Глухова В.И. Схемы замещения электрических двигателей переменного тока // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 11(87). – С. 59–65.

13. Беляков Ю.С. Многополюсник как модель электрических систем. Ч. 2. – М.: Изд-во НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 92 с.

14. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Радионов И.Е. Моделирование тепловых режимов тягового линейного асинхронного двигателя // Электроприводы переменного тока: материалы XVI Международной науч.-техн. конф., 05–09 октября 2015. – Екатеринбург, 2015. – С. 141–144.

15. Беляков Ю.С. Расчет режимов электрических систем, представленных многополюсниками. – М.: Спутник, 2008. – 124 с.

16. Федотов Ю.Б., Нестеров С.А., Мустафа Г.М. Повышение эффективности программ моделирования устройств силовой электроники // A priori. Сер. Естественные и технические науки. – 2015. – № 6. – С. 1–14.

17. Тлустенко С.Ф., Коптев А.Н. Разработка и исследование методологии информационного обеспечения технологических систем агрегатно-сборочного производства летательных аппаратов // Известия Самар. НЦ РАН. – 2015. – Т. 17. – № 6(2). – С. 491–497.

18. Мусаева У.А. Автоматизированное проектирование СВЧ фазовращателя // Молодой ученый. – 2013. – № 3. – С. 83–88.

19. Львов А.А., Львов П.А. Применение комбинированного многополюсного рефлектометра для измерения расстояния до плоской поверхности // Материалы XII Всерос. совещ. по проблемам управления ВСПУ-2014, 16–19 июля 2014. – М., 2014. – С. 7044–7055.

20. Методика проектирования и перспективная конструкция средств снижения шумов судовых трубопроводов / А.Н. Крюков, Е.В. Шахматов, В.Н. Самсонов, А.Н. Дружин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7. – № 3. – С. 67–79.

21. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network // *European Researcher*. – 2013. – Vol. 40. – № 2–1. – P. 259–267.

22. Поплавский В.Б. Формула Крамера для систем линейных уравнений и неравенств над булевой алгеброй // *Известия Саратов. ун-та. Сер. Математика. Информатика*. – 2011. – Вып. 5. – Ч. 2. – С. 43–46.

23. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. Синтез пассивного линейного многополюсника из одной пары зажимов // *Известия НАН РА и ГИУА. Сер. Технические науки*. – 2002. – Т. LV. – № 2. – С. 258–262.

24. Попов С.А., Корчагин А.Ф. Оценивание параметров эквивалентной схемы многополюсников с помощью многооткликowych моделей // *Вестник Новгород. гос. ун-та*. – 2004. – № 28. – С. 150–155.

25. Бессонов А.В., Лузин С.Ю., Лячек Ю.Т. Определение окрестностей многополюсников // *Известия СПбГЭТУ*. – 2015. – № 5. – С. 20–23.

26. Большанин Г.А. Восьмиполюсники. – Братск: Изд-во БрГУ, 2018. – Ч. 1. – 214 с.

27. Большанин Г.А. Экспериментальное определение коэффициентов восьмиполюсника с двумя входными и шестью выходными выводами // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2018. – № 27. – С. 68–91.

28. Большанин Г.А. Восьмиполюсники. – Братск: Изд-во БрГУ, 2018. – Ч. 2. – 232 с.

References

1. Voronov R.A. *Obshchaia teoriia chetyrekhpoliusnikov i mnogopoliusnikov* [The general theory of four-ports and multipoles]. Moscow. Leningrad: Gosenergoizdat, 1951. 192 p.

2. Zeveke G.V. *Mnogopoliusniki* [Multipolar network]. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 1971. 23 p.

3. Popov N.M., Olin D.M., Kirilin A.A. Sposob peredachi signalov po sel'skim raspredelitel'nym setiam 0,38 kV [The method of signal transmission over rural distribution networks 0.38 kV]. *Vestnik Krasnoarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet*, 2017, no. 2, pp. 88–97.

4. Barabanov E.A., Mal'tseva I.S., Barabanov I.O. Algoritm parallel'noi obrabotki dannykh v opticheskikh setiakh [Algorithm for parallel processing of data in optical networks]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 56, no. 3, pp. 88–95.

5. Khansen R.S. Fazirovannye antennye reshetki [Phased antenna arrays]. Moscow: Tekhnosfera, 2012. 560 p.

6. Skobelev S.P. Fazirovannye antennye reshetki s sektornymi diagrammami napravlenosti [Phased antenna arrays with sectorial patterns]. Moscow: Fizmatlit, 2016. 320 p.

7. Faniaev I.A., Kudin V.P. Raspredelitel'naia matritsa dlia pitaniia vos'mielementnoi antennoi reshetki [Distribution matrix for powering an eight-element antenna array]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P.O. Sukhogo*, 2012, no. 4, pp. 52-57.

8. Shauerman A.A. Issledovanie zavisimosti neopredelennosti izmereniia kompleksnogo koeffitsienta otrazheniia okonechnykh ustroystv ot parametrov izmeritel'nogo preobrazovatel'ia [Investigation of the dependence of the uncertainty of measurement of the complex reflection coefficient of terminal devices on the parameters of the measuring transducer]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikatsii i informatiki*, 2013, no. 3, pp. 20-28.

9. Salimonenko D.A. Primenenie metodov lineinogo programmirovaniia dlia opredeleniia parametrov elektricheskikh tsepei. Chast'. 1 [The use of linear programming methods for determining the parameters of electrical circuits. Part 1]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2015, vol. 20, no. 4. pp. 1155-1163.

10. Selivanov V.N. Issledovanie programm rascheta elektromagnitnykh protsessov ATR-EMTR v uchebnom protsesse [Investigation of programs for the calculation of electromagnetic processes ATP-EMTR in the educational process]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 1, pp. 107-112.

11. Kulikov A.L., Lukicheva I.A. Opredelenie mesta ipovrezhdeniia linii elektroperedachi po mgnovennym znacheniiam ostsillogramm avariinykh sobytii [Determination of the location and damage of the transmission line by the instantaneous values of the oscillograms of emergency events]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2016, iss. 5, pp. 16-21.

12. Kitaev A.V., Agbomassu V.L., Glukhova V.I. Skhemy zameshcheniia elektricheskikh dvigatelei peremennogo toka [The equivalent circuit of electric motors of alternating current]. *Elektrotekhnicheskie i komp'iuternye sistemy*, 2013, no. 11(87), pp. 59-65.

13. Beliakov Iu.S. Mnogopoliusnik kak model' elektricheskikh sistem. Chast' 2 [Multipole as a model of electrical systems. Part 2]. Moscow: NTF "EnergoProgress", 2013. 92 p.

14. Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Radionov I.E. Modelirovanie teplovykh rezhimov tiagovogo lineinogo asinkhronnogo dvigatel'ia [Simulation of thermal modes of the traction linear asynchronous motor]. *Elektroprivody peremennogo toka. Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 05-09 Oktober 2015. Ekaterinburg, 2015, pp. 141-144.

15. Beliakov Iu.S. Raschet rezhimov elektricheskikh sistem, predstavlennykh mnogopoliusnikami [Calculation of modes of electrical systems represented by multipoles]. Moscow: Sputnik, 2008. 124 p.

16. Fedotov Iu.B., Nesterov S.A., Mustafa G.M. Povysenie effektivnosti programm modelirovaniia ustroystv silovoi elektroniki [Improving the efficiency of programs for modeling power electronics devices]. *Apriori. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 6, pp. 1-14.

17. Tlustenko S.F., Koptev A.N. Razrabotka i issledovanie metodologii informatsionnogo obespecheniia tekhnologicheskikh sistem agregatno-sborochnogo proizvodstva letatel'nykh apparatov [Development and research of the methodology of information support of technological systems of the aggregate-assembly production of aircraft]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 6(2), pp. 491-497.

18. Musaeva U.A. Avtomatizirovannoe proektirovanie SVCh fazovrashchatelia [Automated design of microwave phase shifter]. *Molodoi uchenyi*, 2013, no. 3, pp. 83-88.

19. L'vov A.A., L'vov P.A. Primenenie kombinirovannogo mnogopoliusnogo reflektometra dlia izmereniia rasstoianiiia do ploskoi poverkhnosti [The use of a combined multi-pole reflectometer for measuring the distance to a flat surface]. *Materialy XII vsrossiiskogo soveshchaniia po problemam upravleniia VSPU-2014*. Moscow, 2014, pp. 7044-7055.

20. Kriukov A.N., Shakhmatov E.V., Samsonov V.N., Druzhin A.N. Metodika proektirovaniia i perspektivnaia konstruktsiia sredstv snizheniia shumov sudovykh truboprovodov [Design methodology and perspective design of noise reduction equipment for ship pipelines]. *Fundamental'naia i prikladnaia gidrofizika*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 67-79.

21. Levitskiy Zhorzh G., Imanov Zhenis Zh., Nurgaliyeva Assel D. Quasianalog transformation of Compound Ventilating Network. *European Researcher*, 2013, vol. 40, no. 2-1, pp. 259-267.

22. Poplavskii V.B. Formula Kramera dlia sistem lineinykh uravnenii i neravenstv nad bulevoi algebroi [Kramer's formula for systems of linear equations and inequalities over Boolean algebra]. *Izvestiia Saratovskogo universiteta. Matematika. Informatika*, 2011, iss. 5, part. 2, pp. 43-46.

23. Акопджанян Г.Д., Сафарян В.С. Синтез пассивного линейного многополюсника из одной пары зажимов [Synthesis of a passive linear multipole from one pair of clamps]. *Izvestiia natsional'noi akademii nauk RA i gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta Armenii. Tekhnicheskie nauki*, 2002, vol. LV, no. 2, pp. 258-262.

24. Попов С.А., Кorchagin А.Ф. Otsenivanie parametrov ekvivalentnoi skhemy mnogopoliusnikov s pomoshch'iu mnogootklikovykh modelei [Estimation of parameters of the equivalent circuit of multipoles using multi-response models]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2004, no. 28, pp. 150-155.

25. Bessonov A.V., Luzin S.Iu., Liachek Iu.T. Opreделение okrestnostei mnogopoliusnikov [Determining the neighborhoods of multipoles]. *Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 5, pp. 20-23.

26. Bol'shanin G.A. Vos'mipoliusniki [Eight poles]. Bratsk: Bratskii gosudarstvennyi universitet, 2018, part. 1. 214 p.

27. Bol'shanin G.A. Eksperimental'noe opredelenie koeffitsientov vos'mipoliusnika s dvumia vkhodnymi i shest'iu vykhodnymi vyvodami [Experimental determination of the coefficients of an eight-port network with two input and six output outputs]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 27, pp. 68-91.

28. Bol'shanin G.A. Vos'mipoliusniki [Eight poles]. Bratsk: Bratskii gosudarstvennyi universitet, 2018, part 2. 232 p.

Сведения об авторе

Большанин Георгий Анатольевич (Братск, Россия) – кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета (665709, Братск, Иркутская обл., ул. Макаренко, 40, e-mail: bolshaning@mail.ru).

About the author

Bolshanin Georgiy Anatolevich (Bratsk, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor Bratsk State University (665709, Bratsk, Irkutsk region, 40, Makarenko str., e-mail: bolshaning@mail.ru).

Получено 17.01.2019

УДК 622.276.001

М.Е. Бурлаков, А.Н. ИвкинСамарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королёва, Самара, Россия**СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ**

На сегодняшний день интерес к искусственным иммунным системам многократно возрос, так как иммунные системы позволяют решать большое количество проблем в сфере компьютерной безопасности. Система обнаружения вторжений обеспечивает защиту от атак при работе в сети. Система сканирует сетевой трафик на наличие сигнатур атак, использующих уязвимости операционной системы и установленных программ. В статье рассмотрена статистическая модель системы обнаружения вторжения, основанная на искусственной иммунной системе. Для корректной работы систем обнаружений вторжений требуется детерминированный набор параметров работы. Наборы детекторов выбраны на основе заголовков пакетов. Используются только значения в заголовках для изучения аномального поведения пакетов во время передачи в любом сетевом трафике стека TCP/IP. На основе результатов тестирования предложены и реализованы методы улучшения системы обнаружения вторжения. В статье для повышения эффективности работы системы обнаружения вторжений объединены теория негативной селекции и правила машинного обучения. В модуле негативной селекции вместо использования только нормального профиля для разделения и классификации пакетов на два разных класса выполняется дополнительная проверка каждого пакета с использованием экспертных правил, созданных ранее на основе таблицы нормального профиля. Таким образом, пакет проходит больше этапов с целью конкретизации, является ли пакет аномальным. В результате частота ложных срабатываний значительно снижается, а частота обнаружения увеличивается. Для генерации детекторов разработан набор базовых правил с использованием программного обеспечения для анализа данных и машинного обучения. Сгенерированы и детализированы детекторы внутри модуля негативной селекции. В статье проводится тестирование предложенной модели на наборе данных DARPA1999.

Ключевые слова: искусственная иммунная система, система обнаружения вторжения, негативная селекция, машинное обучение.

M.E. Burlakov, A.N. IvkinSamara National Research University named after S.P. Korolev,
Samara, Russian Federation**INTRUSION DETECTION SYSTEM BASED
ON THE ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEM**

Today, the interest in artificial immune systems has increased many times, because immune system solves a large number of problems in the field of computer security. Intrusion detection system provides protection against network attacks. The system scans network traffic for signatures of attacks that exploit operating system vulnerabilities and installed programs. The article describes a

statistical model of an intrusion detection system, based on artificial immune system, with the detector sets chosen based on packet headers. For correct operation of intrusion detection systems, a deterministic set of operating parameters is required. Only header values are used to study the anomalous behavior of packets during transmission in any TCP/IP network traffic. Based on the test results, methods for improving the intrusion detection system have been proposed and implemented. The article combines the theory of negative selection, one of the most important theories of artificial immune systems, and the rules of machine learning, and offering a new intrusion detection system. In the negative selection module, instead of using only the normal profile, to separate and classify the packages into two different classes, an additional check of each package is performed using expert rules created earlier on the basis of the normal profile table. Thus, the package goes through more stages, in order to specify whether the package is anomalous. As a result, the frequency of false positives is significantly reduced, and the frequency of detection increases. Generate detectors, a set of basic rules has been developed, using data analysis and machine learning software, and then new detectors were generated and detailed, inside the negative selection module. After testing the proposed model, using the DARPA1999 data set, the model showed good performance compared to previous models.

Keywords: artificial immune system, intrusion detection system, negative selection, machine learning.

Введение. На сегодняшний день в сфере информационных систем существуют задачи по обнаружению и предотвращению вторжений, поиску аномальных запросов и т.д. Для решения подобных задач используются искусственные иммунные системы (ИИС) [1]. ИИС – это адаптивная вычислительная система, основанная на принципах иммунной системы позвоночных. Проблемы в области компьютерной безопасности и иммунных систем имеют сходство в части организации работы в недетерминированных средах. ИИС используют аналог биологической иммунной теории для поиска и разработки моделей и алгоритмов с целью решения различных проблем в области компьютерной безопасности [2].

1. Система обнаружения вторжения *PbPHAD*. Для корректной работы систем обнаружений вторжений (СОВ) требуется детерминированный набор параметров работы (мониторинга). В [3] предлагается статистическая модель СОВ *PbPHAD* (*protocol based packet header anomaly detection*), основанная на ИИС.

В статье [3] наборы детекторов являются значениями в заголовках пакетов, передаваемых в информационном трафике стека *TCP/IP*. В качестве примера предлагается взять отчет [4]. В отчете выбираются 33 поля передаваемых пакетов из протоколов *Ethernet*, *IP*, *TCP*, *UDP* и *ICMP* (табл. 1). Работа СОВ *PbPHAD* связана с тремя протоколами: *TCP*, *UDP*, *ICMP*.

Таблица 1

Статистическая модель *PbPHAD*

<i>i</i>	Название	<i>R</i>	<i>N</i>	Найденные аномалии		
				TCP	UDP	ICMP
1	Etherdesthi	9	12,814,738	0.045	0.057	0.060
2	Etherdestlo	12	12,814,738	0.045	0.056	0.059
3	Etherprotocol	4	12,814,738	0.048	0.060	0.063
4	Ethersize	1456	12,814,738	0.031	0.040	0.041
5	Ethersrchi	6	12,814,738	0.047	0.059	0.061
6	Ethersrclo	9	12,814,738	0.045	0.057	0.060
7	Icmpchecksum	2	7,169	0.000	0.000	0.038
8	Icmpcode	3	7,169	0.000	0.000	0.037
9	Icmptype	3	7,169	0.000	0.000	0.037
10	Ipchecksum	1	12,715,589	0.052	0.065	0.068
11	Ipdest	1934	12,715,589	0.031	0.039	0.040
12	Ipfragid	12489	12,715,589	0.025	0.032	0.034
13	Ipfragptr	2	12,715,589	0.050	0.062	0.065
14	Ipheaderlength	1	12,715,589	0.052	0.065	0.068
15	Iplength	1463	12,715,589	0.031	0.040	0.041
16	Ipprotocol	3	12,715,589	0.049	0.061	0.064
17	Ipsrc	1918	12,715,589	0.031	0.039	0.040
18	Iptos	4	12,715,589	0.008	0.060	0.063
19	Ipttl	11	12,715,589	0.045	0.057	0.059
20	Tcpack	6,015,527	10,617,293	0.008	0.000	0.000
21	Tcpchecksum	2	10,617,293	0.049	0.000	0.000
22	Tcpdestport	22,293	10,617,293	0.023	0.000	0.000
23	Tcpflag	10	10,617,293	0.045	0.000	0.000
24	Tcpheaderlength	3	10,617,293	0.048	0.000	0.000
25	Tcption	3	10,617,293	0.048	0.000	0.000
26	Tcpseq	7,357,319	10,617,293	0.007	0.000	0.000
27	Tcpsreport	22,293	10,617,293	0.023	0.000	0.000
28	Tcpurgptr	2	10,617,293	0.049	0.000	0.000
29	Tcpwindowsize	10,705	10,617,293	0.025	0.000	0.000
30	Udpchecksum	2	2,091,127	0.000	0.056	0.000
31	Udpdestport	8,050	2,091,127	0.000	0.027	0.000
32	Udplength	129	2,091,127	0.000	0.042	0.000
33	Udpsrcport	8,051	2,091,127	0.000	0.027	0.000
<i>n</i>	Итого	13,463,719		1.000	1.000	1.000

Значения столбцов *TCP*, *UDP*, *ICMP* в табл. 1 рассчитываются из соотношения:

$$\text{Result} = \left(1 - \log \frac{R_i}{N_i} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где i – порядковый номер заголовка, R – число аномальных запросов, N – общее число пакетов, связанных с конкретным протоколом.

Из табл. 1 следует, что в модели *COB PьPHAD* чем больше число аномальных полей (R), тем меньше значение аномалии. Значение аномалии, равное 0,000, показывает отсутствие связи поля с конкретным протоколом. Отдельного внимания в табл. 1 заслуживают значения полей *IP*-адресов назначения (*ipdest*) и *IP*-адресов источников (*ipsrc*), показывающие количество хостов, используемых в проведенных испытаниях (рис. 1).

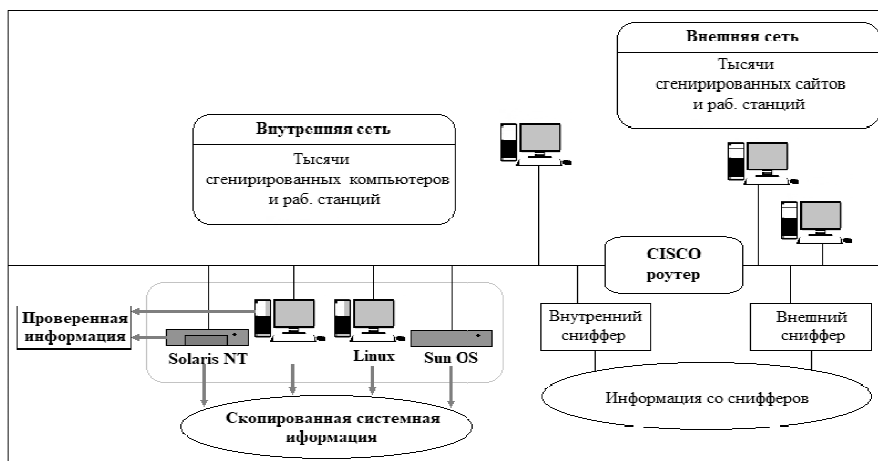


Рис. 1. Модель испытания

На рис. 1 показана модель генерации насыщенного трафика. Автоматические атаки начаты на компьютер жертвы *UNIX* и маршрутизатор со стороны внешних хостов. Машины, обозначенные как сниффер, запускают ПО *tcpdump* для перехвата пакетов, переданных через подключенный сегмент сети. Полученные данные разбиваются повременно, исходя из 5-недельного сбора в формате *pcap*, с собранными данными за 3 недели, используемыми для обучения ИИС, и за 2 недели с данными тестирования [5]. Процесс построения модели *COB PьPHAD* представлен на рис. 2.

Построение делится на 3 этапа:

1. Подготовка данных. Парсинг и конвертирование в формат *csv* собранных ПО *tcpdump* данных. Оценка производительности основывается на 189 обнаруженных аномалиях, зафиксированных в данных тестирования (табл. 2). В табл. 2 показано распределение атак относительно их типа и протоколов реализации. Отдельно отметим, при подготовке данных дублирование протоколов не учитывается.

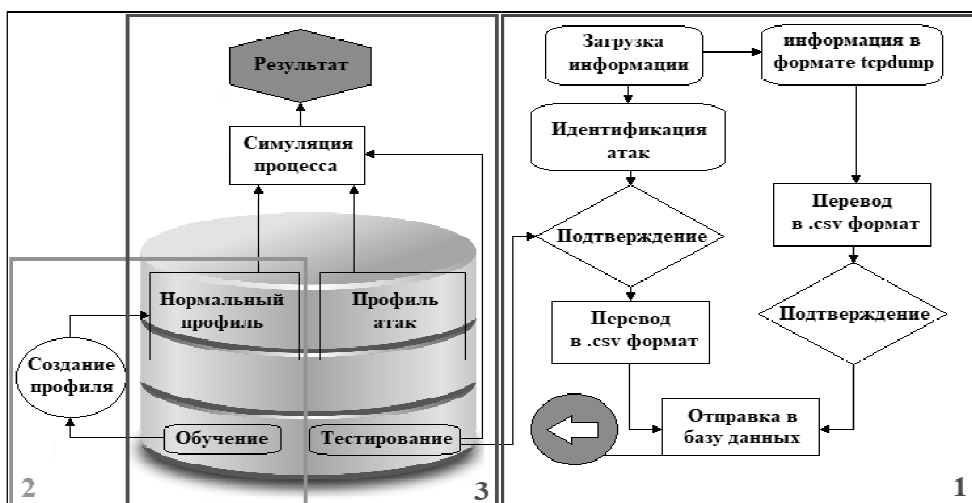


Рис. 2. Модель обнаружения вторжения P6PHAD

Таблица 2

Распределение всех атак во внутренних данных тестирования

Категория	TCP	UDP	ICMP	Всего
Probe	30	7	8	45
Dos	37	10	7	54
U2R	27	0	0	27
R2L	54	3	0	57
Data	4	2	0	6
Всего	152	22	15	189

2. Построение нормализованного профиля. Исходя из п.1, данные обучения заносятся в таблицу базы данных согласно их значениям, указанным в табл. 1 (33 поля).

3. Тестирование. Моделируется сетевой трафик за 2 недели данных тестирования и используется предложенная модель СОВ. 33 поля в пакете (в зависимости от протокола) сравниваются с нормализованным полем по тождественному значению. Если значение поля не найдено в нормализованном профиле, то пакет помечается как аномальный с расчетом статистических характеристик (как в табл. 1). Если сумма значений аномальных обнаруженных полей превышает определенный заданный порог, то происходит фиксация пакета в таблице обнаруженных аномалий.

2. Результаты тестирования СОВ на наборе данных DARPA1999. Протестированная модель содержит 22 095 072 пакетов и 121 зарегистрированную аномалию, превышающие определенные предварительно установленные пороги ($TCP = 0,041$, $UDP = 0,128$, $ICMP = 0,034$) показателей аномалий. Обнаруженные аномальные пакеты составляют около 10 % тестовых данных, включая ложные срабатывания. Выявлены 18 полей заголовков пакетов, внесших вклад в оценку аномалии обнаруженных атак. Распределение частоты аномальных полей показано в табл. 3. Остальные 15 полей заголовков пакетов отмечены как не вносящие вклад в оценку. Таким образом, табл. 3 используется для разработки модели СОВ, принимая во внимание нужные поля заголовков пакетов. Следовательно, время обработки данных будет уменьшено.

Таблица 3

Распределение частот аномальных полей

№ п/п	Поле заголовка пакета	Частота
1	Tcpseq	83
2	Ipsrc	60
3	Ipfragid	53
4	Tcpack	50
5	Ipdest	34
6	Tcpsrcport	16
7	Tcpdestport	11
8	Tcpwindowsize	8
9	Udpsrcport	8
10	Ipfragptr	7
11	Udpdestport	6
12	Udplen	6
13	Iplength	5
14	Tcpflag	4
15	Tcpurgptr	3
16	Tcpchecksum	2
17	Etherdesthi	1
18	Etherdestlo	1

На примере полученных выводов, используя работу [5], проведено тестирование хостовой СОВ *PbPHAD*, и для каждого отдельно исследованного хоста создавался нормализованный профиль. Для анализа взяты значения полей заголовка пакета только из протоколов модели

OSI уровня 3 и 4 (IP, TCP, UDP, ICMP). Общее количество проверяемых полей – 27 (см табл. 1) за исключением первых 6. Время тестирования СОВ *PbPHAD* – 2 недели. В ходе сбора данных собрано 22 095 072 пакетов. Количество обнаруженных аномалий – 154 случая. Таким образом, прирост эффективности работы СОВ по сравнению с предыдущим вариантом составляет 27 %. Хостовая СОВ *PbPHAD* обнаружила 25 аномальных полей по сравнению с 18 обнаруженными в сетевом варианте. В табл. 4 показаны 9 дополнительных полей заголовка пакета (17–25), обнаруженных хостовым вариантом.

Таблица 4

Распределение частот аномальных полей

№ п/п	Поля заголовка пакета	Частота сетевой РbPHAD	Частота хостовой РbPHAD
1	Tcpseq	83	125
2	Ipsrc	60	96
3	Ipfragid	53	15
4	Tcpack	50	55
5	Ipdest	34	13
6	Tcpsrcport	16	64
7	Tcpdestport	11	49
8	Tcpwindowsize	8	22
9	Udpsrcport	8	6
10	Ipfragptr	7	9
11	Udpdestport	6	7
12	Udplen	6	7
13	Iplength	5	38
14	Tcpflag	4	5
15	Tcpurgptr	3	0
16	Tcpchecksum	2	0
17	Ipheaderlen	–	1
18	Iptos	–	1
19	Ipttl	–	1
20	Ipprotocol	–	3
21	Ipchecksum	–	1
22	Tcpheaderlength	–	3
23	Udpchecksum	–	2
24	Icmptype	–	6
25	Icmpcode	–	1

Проведено сравнение между СОВ *PbPHAD* и комбинированными оценочными системами *DARPA1999* на основе атак, классифицированных как «плохо обнаруживаемых» согласно статье [6]. Сетевой СОВ

PbPHAD удалось обнаружить 48 аномалий по сравнению с 15 аномалиями, обнаруженными композитными системами (табл. 5). Полученный результат показывает увеличение на 39,76 % уровня детектирования плохо обнаруживаемых атак. Хостовая СОВ обнаружила 61 аномалию (улучшение на 55,41 %).

Анализируя результаты обнаружения в сетевых и хост-моделях, сетевая СОВ *PbPHAD* лучше с точки зрения определения атак вида *Probe* по сравнению с хостовой СОВ *PbPHAD*. Сетевая версия видит больший горизонт атаки, а хостовая не может обнаружить часть сканирования (например, анализируются пакеты с сигнатурами атак собственного IP адреса). Таким образом, развертывание сетевых и хост-моделей СОВ в рамках сетевой инфраструктуры обеспечит более широкую защиту от злонамеренных атак.

Таблица 5

Общие результаты сравнения СОВ

№ п/п	Название	Категория	Всего	Обнаружено		
				Комб. сист. DARPA1999	Сетевая PьPHAD	Хостовая PьPHAD
1	Ipsweep	Probe	7	0	7	7
2	Lsdomain	Probe	2	1	2	2
3	Portsweep	Probe	13	3	13	13
4	Queso	Probe	4	0	2	3
5	Resetscan	Probe	1	0	1	1
6	Arpoison	DoS	5	1	0	0
7	Dosnuke	DoS	4	2	4	4
8	Selfping	DoS	3	0	1	1
9	Tcpresert	DoS	3	1	2	2
10	Warezcient	DoS	3	0	3	3
11	Ncftp	R2L	5	0	4	5
12	Netbus	R2L	3	1	2	2
13	Netcat	R2L	4	2	0	4
14	Snmppet *	R2L	4	0	0	0
15	Sshstrojan	R2L	3	0	1	1
16	Loadmodule	U2R	3	1	0	2
17	Ntfsdos *	U2R	3	1	0	0
18	Perl	U2R	4	0	3	3
19	Sechole	U2R	3	1	1	2
20	Sqlattack	U2R	3	0	1	2
21	Xterm	U2R	3	1	1	3
Всего			83	15	48	61
Процент обнаруженных				18,07 %	57,83 %	73,49 %
Процент улучшения					39,76 %	55,41 %

3. Улучшение *СОВ РbPHAD*. Взяв во внимания результаты [7–8], предложена гибридная модель СОВ (рис. 3).

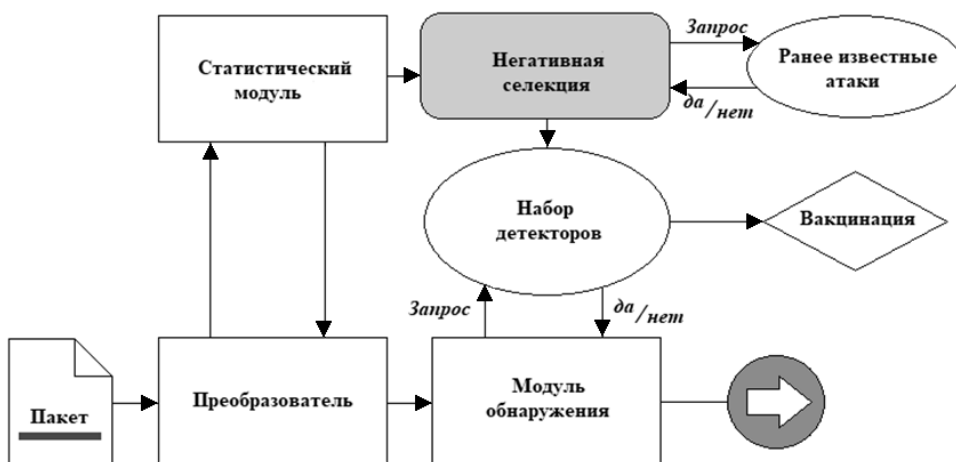


Рис. 3. Гибридная модель СОВ

Отдельное внимание стоит уделить модулю отрицательной селекции [9], отвечающему за:

- создание различных наборов детекторов;
- отправку новых наборов детекторов в другой модуль.

Работа модуля отрицательной селекции показана на рис. 4.

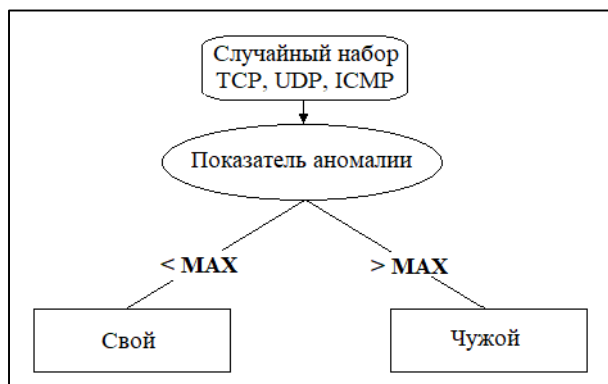


Рис. 4. Работа модуля отрицательной селекции

На рис. 4 создается случайный бинарный набор на основе полей заголовка пакета из табл. 6, для одного из протоколов (*TCP*, *UDP*, *ICMP*), затем рассчитывается показатель аномалии и сравнивается с некоторым пороговым значением (*MAX*). Если показатель аномалии

ниже порогового значения, то набор отбрасывается или считается «своим». Если порог будет превышен, то набор считается «чужим» и отправляется в набор новых детекторов.

Таблица 6

Используемые поля заголовка пакета

TCP	UDP	ICMP
Source IP	Source IP	
Dest. Port	Dest. Port	
IPFragID	IPFragID	Source IP
IPFragOff	IPFragOff	Dest. Port
TCPSeq.	Source Port	IPFragID
TCPAck.	Dest. Port	IPFragOff
Source Port	UDP Length	
Dest. Port		

В статье [7] часть атак некорректно детектируются, следовательно, требуется максимальное уменьшение уровня ложных срабатываний. В финальной версии COB, основанной на ИИС, интегрируется модуль отрицательной селекции (см. рис. 3). В модуле отрицательной селекции вместо использования только нормального профиля для разделения и классификации пакетов на два разных класса «нормальный» и «аномалия» выполняется дополнительная проверка каждого пакета с использованием экспертных правил, созданных ранее на основе таблицы нормального профиля. Таким образом, пакет проходит больше этапов с целью конкретизации, является ли пакет аномальным. В результате частота ложных срабатываний значительно снижается, а частота обнаружения увеличивается. Для создания экспертных правил используется инструмент WEKA [10], содержащий более 80 алгоритмов классификации [11]. В качестве базового алгоритма классификации выбрано дерево J48.

Лист дерева рассматривается как новое экспертное правило. Блок-схема построения дерева с помощью WEKA показана на рис. 5.

На рис. 5 выбирается один из хостов в наборе данных с наибольшим количеством атак, и после генерации имеющихся правил происходит обобщение. Цель обобщения – возможность применения к остальным хостам модели. Для имеющихся хостов создается нормирующий профиль. Профиль фильтруется по определенным протоколам. В результате получают 3 таблицы заголовка пакета протоколов TCP, UDP, ICMP для

конкретного хоста. Далее определяется, является ли пакет атакой или нет, используя *DARPA IDS Dataset*. Выбор подобного набора данных обусловлен ориентацией на решение вопросов, связанных с обучением адаптивных алгоритмов [12–20]. Далее происходит обработка полученных таблиц из протоколов *TCP*, *UDP*, *ICMP* с помощью *WEKA*.

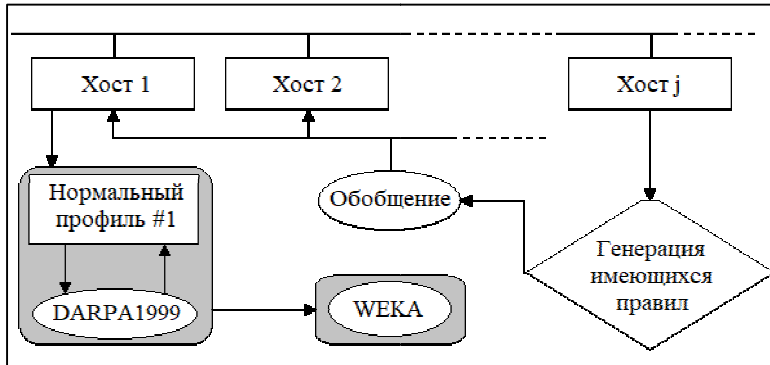


Рис. 5. Построение дерева *WEKA* для конкретного хоста

На рис. 6 показано одно из правил для протокола *UDP*, извлеченное из набора данных. Если *IP*-адрес источника находится в списке аномалий, *UDP*-порт назначения и *UDP*-порт источника меньше 1024, следовательно, пакет является *DOS*-атакой.

```

Time taken to build model: 0.33 seconds

=== Stratified cross-validation ===
=== Summary ===

Correctly Classified Instances      35021      100 %
Incorrectly Classified Instances    0          0 %
Kappa statistic                     1
Mean absolute error                  0
Root mean squared error              0
Relative absolute error               0 %
Root relative squared error          0 %
Total Number of Instances           35021

=== Detailed Accuracy By Class ===

          TP Rate  FP Rate  Precision  Recall  F-Measure  ROC Area  Class
          1      0      1          1      1          1      Normal
          1      0      1          1      1          1      probe
          1      0      1          1      1          1      dos
Weighted Avg.   1      0      1          1      1          1

=== Confusion Matrix ===

  a   b   c  <-- classified as
32895  0   0 |  a = Normal
  0 1990  0 |  b = probe
  0   0 136 |  c = dos
    
```

Рис. 6. Вывод из *WEKA* для конкретного хоста

После создания дерева и использования *WEKA* процесс извлечения экспертных правил не ресурсоемок. Дерево на рис. 7 является результатом классификации, выполненной *WEKA*. Дерево преобразуется в экспертные правила (ветвь – правило).

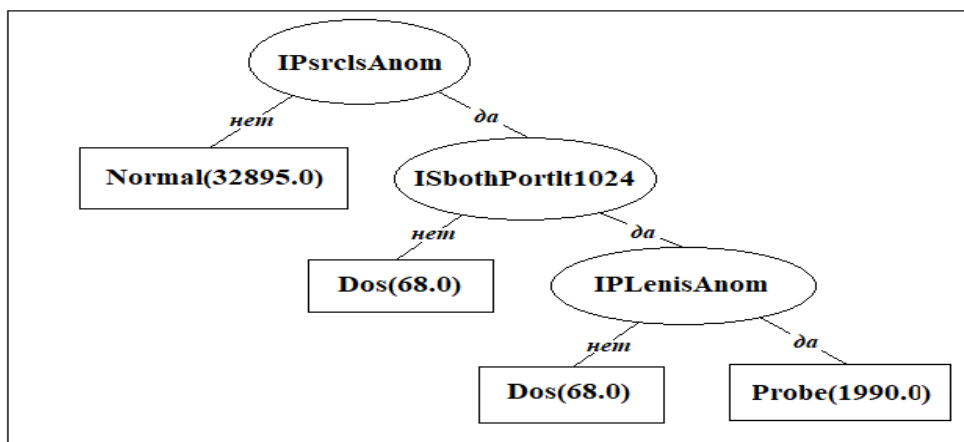


Рис. 7. Дерево *WEKA*

В табл. 7 показана производительность модели с точки зрения частоты обнаружения для различных категорий атак.

Таблица 7

Сравнение с моделью в статье [7]

Категория атаки	Работа из статьи [7]	Финальная модель
Probe	91,32 %	92,59 %
DOS	73,98 %	75,02 %
U2R	62,63 %	66,87 %
R2L	58,45 %	63,39 %

Замена модуля отрицательной селекции на модуль, работающий по экспертным правилам, увеличивает эффективность ИИС в рамках СОВ [7] в части уменьшения ложных срабатываний. Можно сделать вывод: использование отрицательной селекции значительно улучшает производительность СОВ. Конечной оценкой при выборе алгоритма стоит определить количество ложных срабатываний и возможность предельной загрузки системы.

Выводы. В работе рассмотрена СОВ, основанная на ИИС *PbPHAD*, демонстрирующая себя как очень эффективная, основанная

на аномалиях модель СОВ. В работе показана разница между развертыванием сетевых и хостовых СОВ в конкретной сетевой установке в части обеспечения более эффективной защиты сетевой инфраструктуры от умышленных атак. Путем тестирования на наборе данных *DARPA1999* показана возможность улучшения алгоритма ИИС. Произведена эффективная замена модуля отрицательной селекции на модуль из *WEKA*, построенный на основе экспертных правил с использованием ПО для машинного обучения. Проведены сравнения между *PbPHAD* и комбинированными оценочными системами *DARPA1999* на основе атак, классифицированных как «плохо обнаруживаемые» по методике из [4]. Показана общая производительность модели *PbPHAD* с точки зрения ложных срабатываний и частоты обнаружений лучше, чем в комбинированных оценочных системах *DARPA1999*. Получены и подтверждены улучшения с более ранней моделью из [7].

Библиографический список

1. Levitt K.N., Mykejee B. Network intrusion detection // IEEE Network. – 1995. – Vol. 2. – P. 25–40.
2. McLeod J., Aickelin U. Danger theory: the link between AIS and IDS // Proc. ICARIS-2003: 4nd International Conf. on Artificial Immune Systems. – 2003. – P. 130–160.
3. Solahuddin Michael E. Woodward. Modeling Protocol Based Packet Header Anomaly Detector for Network and Host Intrusion Detection Systems / Dep. of Computing, School of Inf. Un. of Bradford, U.K. – January 2008.
4. Mahoney M.V. PbPHAD: Packet Header Anomaly Detection for Identifying Hostile Network Traffic. Tech. rep. Florida CS-2002-4 (April 2002).
5. MIT Lincoln Lab. 1999 DARPA Data Sets. – 1999. – URL: http://www.ll.mit.edu/IST/ideval/data/1999/1999_data_index.html.
6. Haines J.W., Fried D.J. The 1999 DARPA Off-Line Intr. Det. Evaluation. MIT Lincoln Lab. – 2002.
7. Mahboubian M., A naturally inspired statistical intrusion detection model // Proc. of ICINC. – Malaysia, 2010.
8. Mahboubian M. A novel intrusion detection model based on combination of artificial immune system and data mining approaches // Proc. WEC-2010. – Malaysia, 2010.

9. Li X., Duan S.R. The anomaly intrusion detection based on immune negative selection algorithm // Proc. IEEE International Conference on Granular Computing. – 2009.
10. WEKA. Soft. Machine Learn. The Un. of Waikato, New Zealand. – URL: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>
11. Shamsuddin S.B. Applying knowledge discovery in database techniques in modeling packet header anomaly intrusion detection systems // Journal of Software. – 2008. – Vol. 2, № 9.
12. Stolfo S.J. Anomalous Payload-based Network Intrusion Detection // Heidelberg. – 2004. – Vol. 3. – P. 190–240.
13. Chan P.K. Learning Rules for Anomaly Detection of Hostile Network Traffic // Proc. of the 3rd IEEE Int. Conf. on Data Mining. – 2003.
14. Marin G.A. Modeling Networking Protocols to Test Intrusion Detection Systems // LCN 2005. IEEE Intern. Conf. on Local Comp. Net. – 2005.
15. Detection of Novel Network Attacks Using Data Mining / L. Ertoz, E. Eilertson, A. Lazarevic, P.N. Tan, P. Dokas, V. Kumar, J. Srivastava // Proc. of SIAM Conf. Data Mining. – 2003.
16. Etalle D., Zambon P. POSEIDON: A 2-Tier Anomaly Based IDS // IWIA 2006. Proc. 4th IEEE Intern. Workshop on Inform. Assurance. – 2006. – P. 140–160.
17. Vliet F.V. Turnover Poseidon: Incremental Learning in Clustering Methods for Anomaly based Intrusion Detection // Proc. 20th Stud. Conf. on IT, University of Twente. – 2006.
18. Couto D., Popyack S. ADAM: Detecting intrusions by data mining // Proc. of the IEEE Workshop on Inform. Assurance and Security. – 2001.
19. Tian C., Huang S. Applying Genetic Programming to Evolve Learned Rules for Network Anomaly Detection // ICNC 2005. LNCS. – Heidelberg, 2005. – Vol. 3. – P. 290–350.
20. Mohammad Mahboubian. An alert fusion model inspired by artificial immune system // Conf.: Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic, IEEE, Malaysia. – July 2012. DOI: 10.1109/CyberSec.2012.6246083

References

1. Levitt K.N., Mykejee B. Network intrusion detection. *IEEE Network*, 1995, vol. 2, pp. 25-40.

2. McLeod J., Aickelin U. Danger theory: the link between AIS and IDS. *Proc. ICARIS-2003: 4th International Conf. on Artificial Immune Systems*, 2003, pp. 130-160.
3. Solahuddin Michael E. Woodward. Modeling Protocol Based Packet Header Anomaly Detector for Network and Host Intrusion Detection Systems. Dep. of Computing, School of Inf. Un. of Bradford, U.K. January 2008.
4. Mahoney M.V. PbPHAD: Packet Header Anomaly Detection for Identifying Hostile Network Traffic. Tech. rep. Florida CS-2002-4 (April 2002).
5. MIT Lincoln Lab. 1999 DARPA Data Sets, 1999, available at: http://www.ll.mit.edu/IST/ideval/data/1999/1999_data_index.html.
6. Haines J.W., Fried D.J. The 1999 DARPA Off-Line Intr. Det. Evaluation. MIT Lincoln Lab. 2002.
7. Mahboubian M., A naturally inspired statistical intrusion detection model. *Proc. of ICINC*. Malaysia, 2010.
8. Mahboubian M. A novel intrusion detection model based on combination of artificial immune system and data mining approaches. *Proc. WEC-2010*. Malaysia, 2010.
9. Li X., Duan S.R. The anomaly intrusion detection based on immune negative selection algorithm. *Proc. IEEE International Conference on Granular Computing*, 2009.
10. WEKA. Soft. Machine Learn. The Un. of Waikato, New Zealand, available at: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka>
11. Shamsuddin S.B. Applying knowledge discovery in database techniques in modeling packet header anomaly intrusion detection systems. *Journal of Software*, 2008, vol. 2, no. 9.
12. Stolfo S.J. Anomalous Payload-based Network Intrusion Detection. *Heidelberg*, 2004, vol. 3, pp. 190-240.
13. Chan P.K. Learning Rules for Anomaly Detection of Hostile Network Traffic. *Proc. of the 3rd IEEE Int. Conf. on Data Mining*, 2003.
14. Marin G.A. Modeling Networking Protocols to Test Intrusion Detection Systems. *LCN 2005. IEEE Intern. Conf. on Local Comp. Net*, 2005.
15. Ertöz L., Eilertson E., Lazarevic A., Tan P.N., Dokas P., Kumar V., Srivastava J. Detection of Novel Network Attacks Using Data Mining. *Proc. of SIAM Conf. Data Mining*, 2003.
16. Etalle D., Zambon P. POSEIDON: A 2-Tier Anomaly Based IDS. *IWIA 2006. Proc. 4th IEEE Intern. Workshop on Inform. Assurance*, 2006, pp. 140-160.

17. Vliet F.V. Turnover Poseidon: Incremental Learning in Clustering Methods for Anomaly based Intrusion Detection. *Proc. 20th Stud. Conf. on IT, University of Twente*, 2006.

18. Couto D., Popyack S. ADAM: Detecting intrusions by data mining. *Proc. of the IEEE Workshop on Inform. Assurance and Security*, 2001.

19. Tian C., Huang S. Applying Genetic Programming to Evolve Learned Rules for Network Anomaly Detection. *ICNC 2005. LNCS*. Heidelberg, 2005, vol. 3, pp. 290-350.

20. Mohammad Mahboubian. An alert fusion model inspired by artificial immune system. *Conf.: Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic, IEEE*, Malaysia. July 2012. DOI: 10.1109/CyberSec.2012.6246083

Сведения об авторах

Бурлаков Михаил Евгеньевич (Самара, Россия) – старший преподаватель кафедры «Безопасность информационных систем» Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (443086, Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: knownwhat@gmail.com).

Ивкин Андрей Николаевич (Самара, Россия) – аспирант Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (443086, Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: ivkin.92@bk.ru).

About the authors

Burlakov Mikhail Evgenyevich (Samara, Russian Federation) is a Senior Lecturer in Department of information security systems Samara National Research University (443086, Samara, 34, Moskovskoye highway, e-mail: knownwhat@gmail.com).

Ivkin Andrey Nikolaevich (Samara, Russian Federation) is a Graduate Student Samara National Research University (443086, Samara, 34, Moscow highway, e-mail: ivkin.92@bk.ru).

Получено: 17.01.2019

**УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ
В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ»**

1. Общие положения

1.1. Журнал «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления» является периодическим печатным научным рецензируемым журналом (ISSN печатной версии – 2224-9397, ISSN электронной версии – 2305-2767). Журнал «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ №ФС77-56518 от 26.12.2013 г. До 2012 г. журнал носил название «Вестник Пермского государственного технического университета. «Электротехника, информационные технологии, системы управления» (ISSN – 2075-7689).

1.2. Журнал выпускается в Пермском национальном исследовательском политехническом университете.

1.3. Журнал включен в перечень ВАК и в проект «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

1.4. Журнал выходит 4 раза в год. Установлены сроки выхода номеров:

Номер	Сроки приема статей	Сроки выхода номера
1	до 15 марта	30 марта
2	до 15 июня	30 июня
3	до 15 сентября	30 сентября
4	до 15 декабря	30 декабря

2. Требования к представляемым материалам

К опубликованию в журнале принимаются статьи (в том числе обзорного характера), ранее не публиковавшиеся и содержащие существенные результаты в области электротехники, информационных технологий, систем управления.

2.1. Рукописи статей объемом до 15 страниц (для обзоров – до 30 страниц), подготовленные с помощью редактора текста Word for Windows 7, направляются по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, ПНИПУ, редакция журнала «Вестник Пермского национально-исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления». Электронный вариант статьи одновременно направляется на адрес e-mail: pngru.elinf@yandex.ru.

2.2. Правила оформления статьи:

Заголовки: название статьи: шрифт – Times New Roman Cyr, полужирный; размер символов – 14; подзаголовки (при наличии): шрифт – Times New Roman Cyr, полужирный; размер символов – 12. Выравнивание заголовка и подзаголовка – по центру.

Текст статьи: шрифт – Times New Roman Cyr; размер символов – 12; межстрочный интервал – одинарный; выравнивание по ширине страницы; переносы желательны не использовать; поля страницы: левое – 24 см; правое – 2 см; верхнее – 2,5 см; нижнее – 2,5 см. Абзацный отступ 0,5 см.

Для набора формул используется редактор Equation 2.0 и MathType, параметры: шрифт – Times New Roman Cyr; размер: 12 (обычный); формулы размещать по центру, а их номера – у правого поля страницы. Тензорные и векторные величины набираются прямым полужирным шрифтом, греческие символы – прямым шрифтом, латинские скалярные величины и индексы – наклонным (курсивом).

Рисунки и таблицы, содержащиеся в статье, рекомендуются оформлять согласно следующим правилам:

– рисунки и таблицы помещаются внутри текста, в центре страницы;

– фотографии должны подаваться в электронном виде, сохраненные в одном из форматов хранения растрового изображения;

– рисунки должны быть подготовлены в векторных графических форматах;

– на рисунки и таблицы в тексте должны быть ссылки.

2.3. Библиографический список оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа. Романоязычный список литературы (в романском алфавите, т.е. в латинице) обязателен.

2.4. Все статьи «Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления» подлежат обязательному рецензированию членами редколлегии и независимыми внешними экспертами. Авторы извещаются о результатах рецензирования.

2.5. В редколлегию должны быть представлены:

2.5.1. Номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи).

2.5.2. Название статьи на русском и английском языках.

2.5.3. Аннотация статьи (не менее 200 слов) на русском и английском языках.

2.5.4. Ключевые слова статьи (до 15 слов) на русском и английском языках.

2.5.5. Текст статьи, оформленный согласно требованиям (см. п. 2.3).

2.5.6. Сведения об авторах на русском и английском языках.

2.5.7. Сопроводительное письмо на имя главного редактора серии, подписанное руководителем организации, в которой работает автор.

2.5.8. Акт экспертизы о возможности опубликования статьи в открытой печати.

2.6. Редакция кроме бумажного издания журнала организует формирование полнотекстовых электронных версий статей журнала, доступных на сайте журнала.

3. Рассмотрение материалов

3.1. Представленные в редколлегию материалы первоначально рассматриваются на предмет выполнения требований к оформлению и передаются для рецензирования. После одобрения материалов (или согласования различных вопросов с автором) редколлегия сообщает автору решение об опубликовании работ или направляет автору мотивированный отказ.

3.2. После издания номера журнала в течение месяца редколлегия высылает автору по указанному в сведениях об авторе адресу один экземпляр журнала;

3.3. Публикация статей осуществляется бесплатно;

3.4. Более подробную информацию можно получить на сайте журнала <http://vestnik.pstu.ru/elinf/about/inf/> или по электронной почте e-mail: pnrpu.elinf@yandex.ru.

Научное издание

ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ,
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

PERM NATIONAL RESEARCH POLYTECHNIC
UNIVERSITY BULLETIN
**ELECTROTECHNICS,
INFORMATION
TECHNOLOGIES,
CONTROL SYSTEMS**

№ 29

Редактор и корректор *И.Н. Жеганина*

Выход в свет 29.03.2019. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 18,38. Тираж 100 экз. Заказ № 42/2019.
Свободная цена

Отпечатано в типографии издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.