

Вестник
Самарского
Государственного
Технического
Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
Издается с августа 1993 г.
Выходит 4 раза в год
апрель – 2020

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

№ 1 (65) – 2020

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор серии Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)
Отв. секретарь серии И.Г. Минакова

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)
Е. Вааке (проф., Германия)
В.И. Батищев (д.т.н., проф.)
Л.С. Зимин (д.т.н., проф.)
Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)
О.С. Колосов (д.т.н., проф.)
П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)
В.И. Лачин (д.т.н., проф.)
М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)
S. Luri (проф., Италия)
V. Naske (проф., Германия)
С.П. Орлов (д.т.н., проф.)
Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)
Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)
В.К. Тянь (д.т.н., проф.)
M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (№ 1(65) – 2020)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка И.Г. Минова

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.

Подписано в печать 20.05.2020.
Выход в свет 10.06.20

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»
443100, г. Самара,
ул. Молодогвардейская, 244
Главный корпус

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 19,7 п.л.
Уч.-изд. л. 18,9 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 55/20.
Заказ № 250.

Телефон: (846) 337 03 42
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; 05.09.00 – Электротехника.

Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>), на сайте СамГТУ (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>.

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2020
© Самарский государственный
технический университет, 2020

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Цена свободная

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

April – 2020

Technical Sciences Series

2020. Issue 1 (65)

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief of Series E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Executive Secretary of Series I.G. Minakova

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L. S. Zimin L.S. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci., Prof., South Ural State University)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow Power Engineering Institute)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof., South-Russian State Technical University (NPI))

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof., Moscow State Mining University)

Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.K. Tian (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

Edited by G. V. Zagrebina
Compiled and typeset by I. G. Minakova

The Editorial Board Address:

Dept. of Automatic and Control in Technical Systems

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 03 42

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>).

The subscription index in Rospechat catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

<i>Басыня Е.А.</i> Программная реализация и исследование системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия.....	6
<i>Бурцев А.В., Евелев А.Л., Качалин В.П.</i> Оперативное математическое моделирование макроэкономических процессов в электротехнической и металлургической отраслях промышленности Самарской области	22
<i>Кузнецов В.М., Песошин В.А., Гумиров А.И., Шишова Д.В.</i> Анализ свойств вероятностных моментов двоичных последовательностей для задач моделирования стохастических объектов.....	34
<i>Митрошин В.Н., Свиридов К.О.</i> Автоматизированная система управления технологическим процессом изолирования жил кабелей связи.....	49
<i>Моисеева Т.В., Муханов Ю.С.</i> О методах визуализации знаний акторов при интересубъективном управлении разрешением проблемных ситуаций.....	62
<i>Учайкин Р.А., Орлов С.П.</i> Сравнительная оценка эффективности компьютерной техники в подразделениях промышленного предприятия.....	74

Электротехника

<i>Алехин Р.А., Кубарьков Ю.П.</i> Применение устройств STATCOM для регулирования напряжения в энергосистеме с помощью метода поиска летучей мыши.....	87
<i>Базаров А.А., Бондарева Н.В.</i> Моделирование процессов деформации в запорных устройствах.....	100
<i>Рахаев А.В.</i> Анализ методов проектирования централизованной системы автоматического регулирования напряжения в электрических сетях.....	114
<i>К 115-летию со дня рождения Лонгина Францевича Куликовского</i>	129
<i>К 115-летию со дня рождения Виталия Николаевича Никольского.....</i>	132

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.89

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.А. Басыня

Новосибирский государственный технический университет,
Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Аннотация. *Описывается проблематика информационно-коммуникационного взаимодействия технических объектов и систем. Анализируются уязвимости стека протоколов TCP/IP, несовершенство операционных систем и прикладного программного обеспечения, сложность полноценной взаимной интеграции различных систем. Излагается следствие экономии вендоров сетевых решений на вычислительных мощностях в виде архитектурных ограничений и уязвимостей. Рассматривается проектирование, программная реализация и экспериментальное исследование авторской системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия, функционирующей на основе ранее представленного одноименного метода. Применяется современный стек технологий в сочетании с гибкой методологией разработки. Научная новизна работы заключается в предлагаемой архитектуре комплексного программного продукта по управлению информационной инфраструктурой предприятия. Повышение эффективности, надежности, безопасности и отказоустойчивости функционирования технических объектов и систем достигается применением платформы автоматизации развертывания и управления приложениями в среде многослойной виртуализации. Осуществляется изоляция рабочих сервисов с возможностью автоматического перезапуска любого компонента без нарушения штатного режима работы инфраструктуры. Снимается ряд ограничений, присущих существующим решениям: число одновременно поддерживаемых VPN-подключений, задаваемых политик, правил. Повышение уровня конфиденциальности сетевого взаимодействия, как и противодействия анонимным несанкционированным возмущениям, достигается полноценной интеграцией с оверлейными технологиями и сетями, поддержкой широкого спектра современных криптоустойчивых алгоритмов шифрования с возможностью многослойной инкапсуляции. Для оценки эффективности разработанной системы приводится экспериментальный сравнительный анализ с различными существующими решениями: комплексными межсетевыми экранами, маршрутизаторами, системами обнаружения и предотвращения вторжений, а также другими инструментами управления трафиком.*

Басыня Евгений Александрович (к.т.н.), доцент Новосибирского государственного технического университета, директор Научно-исследовательского института информационно-коммуникационных технологий.

Ключевые слова: интеллектуально-адаптивное управление, системный анализ, обработка, сетевой трафик, локальные информационные процессы, TCP/IP, IDS/IPS, SIEM, UTM, NGFW.

Введение

Автоматизацию бизнес-процессов любого предприятия не стоит рассматривать без учета аспектов информационной безопасности, актуальность которых непрерывно возрастает. Только за первые восемь месяцев 2019 года количество зарегистрированных киберпреступлений в России показало годовой рост на 66,8 % по данным Генпрокуратуры.

Одной из ключевых проблем в этой области является отсутствие комплексного подхода к безопасному системному анализу, обработке и управлению данными в рамках информационной инфраструктуры предприятия. Мировые вендоры инфокоммуникационных решений реализуют стек управляемого сетевого оборудования от коммутаторов до межсетевых экранов. Другие компании предоставляют продукты в области системного и сетевого администрирования. Третьи – в области информационной безопасности. Четвертые – в области автоматизации бизнес-процессов. Данный перечень включает десятки наименований. Анализ проблематики предметной области выводит на первый план ряд существенных недостатков индустрии:

- уязвимости стека протоколов TCP/IP [1, 2] (жесткая логика функционирования, отсутствие проверки подлинности субъектов взаимодействия в базовых протоколах и мн. др. В качестве примера стоит привести возможность подмены DHCP сервера <англ. Dynamic Host Configuration Protocol – протокол динамической настройки узла> через фальсификацию первого ответа);

- несовершенство программного обеспечения [3, 4] (неотлаженные технологические процессы разработки программных продуктов в ряде компаний: отсутствие корректного применения гибкой методологии с инспекцией / рецензированием кода, проверкой всех технических параметров автотестами и осуществлением непрерывной интеграции <англ. Continuous Integration & Continuous Delivery, CI/CD>);

- несовершенство операционных систем (помимо проблем предшествующего пункта стоит выделить возможность наличия бэкдоров <скрытых инструментов несанкционированного управления и сбора данных об объекте> в проприетарных продуктах с закрытым исходным кодом, а также сложность распределенной разработки решений с открытым исходным кодом на энтузиазме. В качестве примера стоит привести уязвимость в командной оболочке bash CVE-2014-6271, эксплуатирующую некорректное определение функций и обработку переменных окружения. Она просуществовала 22 года, позволяя удаленно выполнять код);

- сложность полноценной взаимной интеграции продуктов [5, 6] (даже внутри одного модельного ряда крупной компании встречаются разные версии решений с различными незадокументированными программными интерфейсами приложений <англ. Application programming interface>. Это связано с отсутствием системы контроля версий при использовании аутсорсинга в разных компаниях);

- экономия на вычислительных мощностях (использование слабой аппаратной базы MIPS/ARM <англ. Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages и Advanced RISC Machine> приводит к вынужденному применению устаревших компонентов программной реализации, а также алгоритмов шифрования с низкой криптографической стойкостью [7–10]. Например, DES или 3DES <англ. Triple Data Encryption Standard> вместо AES <Advanced Encryption Standard>);

– архитектурные уязвимости [11, 12]: неправильный выбор стека технологий и компонентов, отсутствие изоляции модулей, отсутствие корректной интеграции компонентов (следствие: ограничение на количество задаваемых политик, размер адресного пула правил, скорость обработки данных, порог надежности и отказоустойчивости систем);

– ограничения законодательства различных стран (навязывание устаревших алгоритмов, низкой битности шифрования, интеграции сторонних обфусцированных модулей при сертификации).

Большинство проблем обусловлены погоней корпораций за рентабельностью, которая часто включает плагиат решений с открытым исходным кодом в нарушение открытого лицензионного соглашения (англ. GNU General Public License) – полученные результаты продаются, а не передаются в общественную собственность.

Описанные ключевые недостатки имеют общий существенный признак – жесткую логику функционирования, не адаптированную под нештатные незадекларированные внутренние и внешние возмущения. Важно отметить, что с технической точки зрения требуется учитывать проблемы «нулевого дня», приводящие к нарушениям штатной работы объектов, но ранее не опубликованные в общем доступе [13, 14]. Сбой одного компонента системы может повлечь за собой крах всей критической инфраструктуры.

Цель работы

Целью данной работы являлось проектирование, программная реализация и исследование системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия (далее – Система или СИАУ ИИП), функционирующей на основе ранее представленного одноименного метода [15].

Научная новизна работы заключается в создании комплексного универсального решения по управлению информационной инфраструктурой предприятия, повышающего эффективность, надежность, безопасность и отказоустойчивость функционирования технических объектов и систем за счет созданной программной архитектуры с применением платформы автоматизации развертывания и управления приложениями в среде многослойной виртуализации. Данная архитектура позволила снять ряд ограничений, присущих межсетевым хостам: число одновременно поддерживаемых VPN подключений, задаваемых политик, правил. Повышение уровня конфиденциальности сетевого взаимодействия, как и противодействия анонимным несанкционированным возмущениям, достигается полноценной интеграцией с оверлейными технологиями и сетями, поддержкой широкого спектра современных криптоустойчивых алгоритмов шифрования с возможностью многослойной инкапсуляции. Прогнозирование реакции систем и сервисов на различные внешние воздействия обеспечивается виртуализацией и многослойной изоляцией модельных объектов. Это, в свою очередь, позволяет осуществлять изоляцию рабочих сервисов с возможностью автоматического перезапуска любого компонента без нарушения штатного режима работы инфраструктуры.

1. Программная реализация предлагаемого решения

В рамках программной инженерии архитектура авторской системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия была выполнена с использованием платформы автоматизации развертывания

и управления приложениями в среде виртуализации, что обеспечивает дополнительную надежность и отказоустойчивость решения с изоляцией его компонентов (рис. 1 и 2).

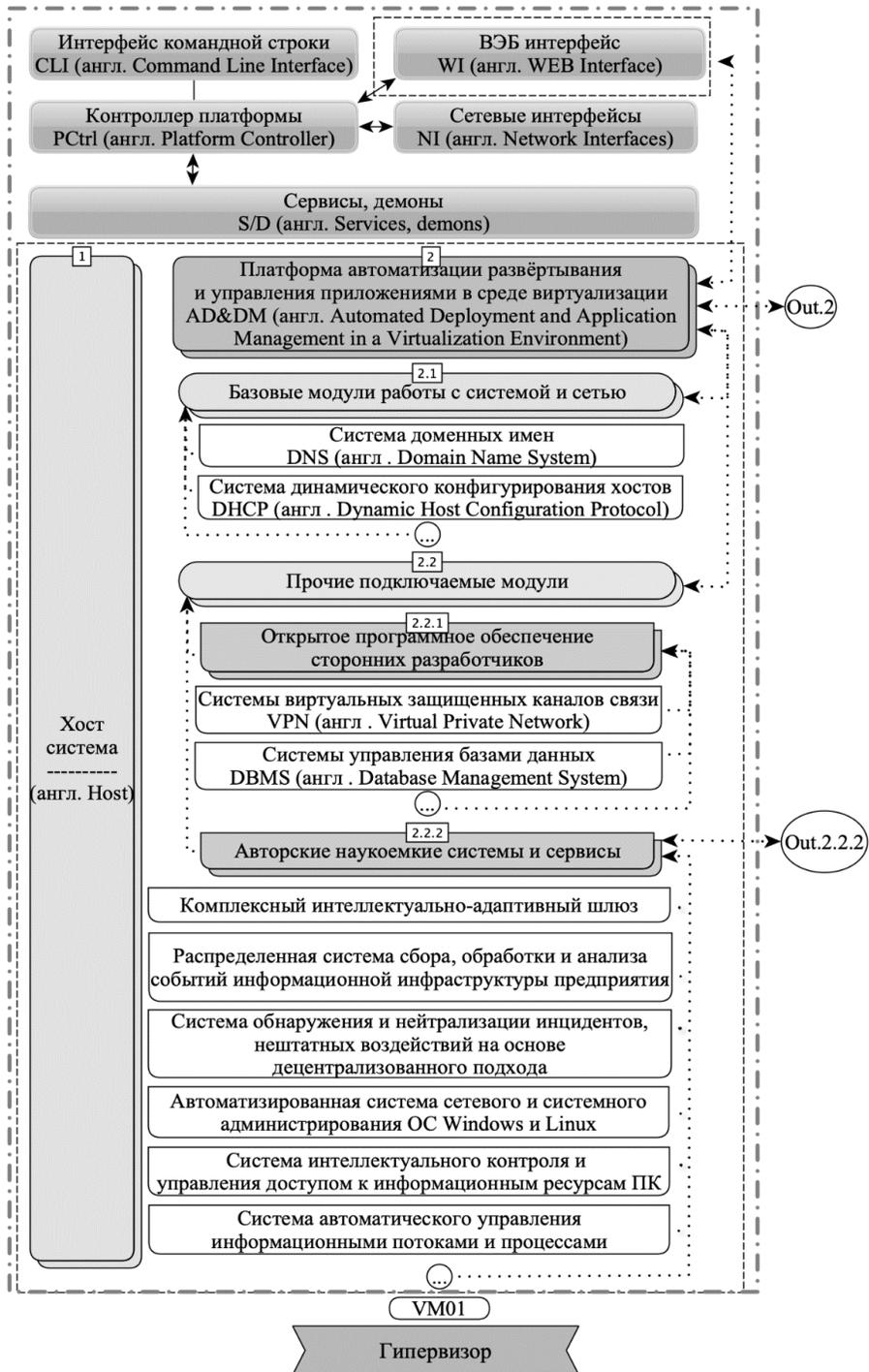


Рис. 1. Архитектура СИАУ ИИП (часть 1)

Контроллер платформы (англ. Platform controller) – это средство достижения инкапсуляции, изоляции и управления информационными потоками между модулями системы. Взаимодействие системы с пользовательскими ЭВМ, сетевым оборудованием, серверными решениями на базе гипервизора и физических серверов проиллюстрировано на рис. 2.

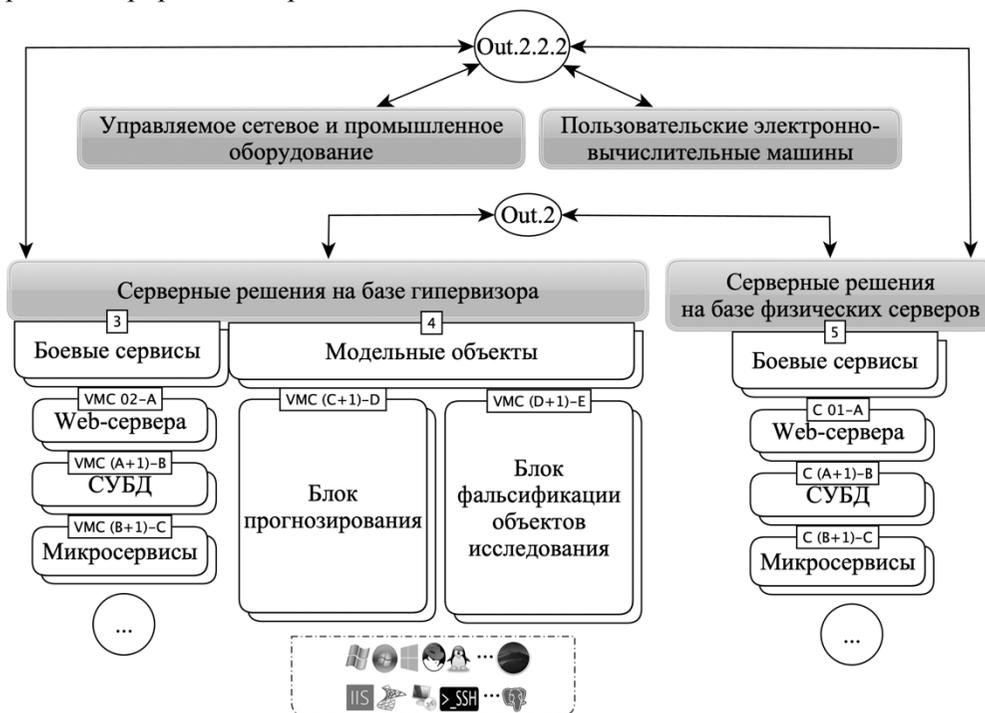


Рис. 2. Архитектура СИАУ ИИП (часть 2)

Рассмотрим реализацию отдельных компонентов системы с аргументацией выбора стека технологий:

1) веб-приложения Системы были написаны на языке Python с использованием веб-фреймворка Django, что является унифицированным решением для типовых задач информационных систем с учетом масштаба Системы, низкой нагрузки на веб-часть, использования стандартных элементов, низкого порога вхождения в долгосрочную поддержку и сопровождения СИАУ ИИП;

2) автоматическая установка и конфигурирование серверных решений производились на основе написанных оригинальных скриптов системы Ansible. Такой выбор решения задачи автоматического развертывания обусловлен ее гибкостью и управляемостью, а также возможностью реализации удаленного развертывания и настройки программного обеспечения без установки клиентского компонента программы на конечный хост, что является ключевым преимуществом данной системы перед аналогами, в том числе – Puppet и Chef. Системой Ansible производится проверка управляемого узла на соответствие описанному в сценарии состоянию, при несоответствии осуществляется выполнение задач согласно их порядку. Также реализован механизм добавки в сценарий обработчиков событий, для задания которых используется параметр notify. Ключевой особенностью Ansible является формирование информативного отчета о результатах выполнения сценариев, содержащего причины возникших ошибок. Помимо этого, данная система предусматривает большое количество дополнительных модулей, позволяющих решить

множество задач управления и развертывания, разделяемых на следующие группы: работа с облачными сервисами, управление базами данных, управление информационной инфраструктурой, работа с системными ресурсами, работа с файлами, в том числе выполнение их шаблонизации, реализация оповещений о процессе применения плейбуков и т. д.;

3) система изолированной сборки и развертывания приложений была реализована на платформе Docker, выполняющей размещение программного обеспечения в специализированных контейнерах с целью облегчения развертывания, отладки и переносимости программной реализации компонентов системы. Docker имеет клиент-серверную архитектуру, согласно которой демон Docker запускается на целевом узле и предназначается для обеспечения изоляции контейнеров, а клиентская часть служит пользовательским интерфейсом для обращения к демону;

4) дополнительный слой виртуализации организован на базе виртуальных машин гипервизора ESXI, где развертываются модельные объекты блоков прогнозирования и фальсификации объектов исследования, а также рабочие корпоративные серверные решения;

5) автоматизация развертывания, масштабирования и управления контейнеризированными высоконагруженными рабочими корпоративными приложениями осуществляется через Kubernetes;

6) управление репозиториями кода и разработкой Системы выполнялось с использованием систем GitLab (показывающей корректную работу в связке с Docker) и Redmine;

7) модуль высокопроизводительного асинхронного обмена сообщениями был написан с использованием библиотеки ZeroMQ;

8) обработка очередей сообщений реализовывалась на базе RabbitMQ;

9) распределенная асинхронная очередь заданий включала Celery;

10) в качестве операционной системы для реализации решения по соотношению надежности, безопасности, отказоустойчивости, актуальности версий ПО, а также вследствие наименьшего потребления ресурсов процессора и памяти была выбрана LinuxCentOS. Помимо этого, поддерживается совместимость с AlpineLinux;

11) сборка дистрибутива алгоритма производится конвейером gitlab из различных компонентов, тогда как с целью достижения изоляции, а также обеспечения стабильности и воспроизводимости компонентов выполнено их размещение в контейнеры Docker.

Основными компонентами программной реализации системы, взаимодействие которых обеспечено с помощью zeromq message broker, являются:

1) графический интерфейс UI, реализованный на Python с применением веб-фреймворка Django, СУБД PostgreSQL, очереди заданий Celery и хранилища данных Redis, предназначенный для выполнения настройки системы. Взаимодействие с прочими компонентами осуществляется с помощью API с использованием синхронного веб-сервера. Для реализации веб-интерфейса использованы фреймворки bootstrap и jQuery;

2) интерфейс командной строки CLI, представляющий собой программный комплекс, написанный на языке программирования Python и необходимый для настройки алгоритма из командной строки. Реализована поддержка шаблонов настройки на языке yaml. Для обеспечения вывода данных аналитики был использован rddtool, а для реализации графического интерфейса настройки применена библиотека curses. В целях автоматизации развертывания и настройки алгоритма

реализован неинтерактивный режим работы утилит управления и настройки из шаблонов;

3) модуль удаленного доступа `remote`, реализованный на Python и представляющий собой систему самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий. Модуль состоит из клиентской части, интегрированной с клиентскими компонентами протоколов SSH и RDP, и серверной части, ответственной в том числе за управление модулем `netfilter` ядра ОС;

4) модуль управления конфигурацией операционной системы `configurator`, реализованный на Python и предназначенный для управления конфигурацией запущенных в `docker-swarm` контейнеров, а также конфигурацией ОС с помощью ролей Ansible. Передача команд конфигурации модулю `configurator` от UI и CLI выполняется через информационную шину, для хранения параметров конфигурации использован UI, для их настройки – UI и CLI;

5) модуль сбора, анализа и управления сетевым трафиком `network`, реализованный на C++ с использованием библиотеки `libpcap`. Для непосредственно управления трафиком использован модуль ядра, `netfilter` и настройки таблицы маршрутизации. Для подготовки данных для анализа задействован компонент, реализованный на C++, анализ выполняется частично на C++ и Python, для интеграции кода на данных языках использован Python;

6) модуль сбора, систематизации и анализа журналов ОС и установленных компонентов `log`, реализованный на C++. Хранение собранных из сообщений системных журналов и компонентов ОС данных реализовано в СУБД. В случае, когда работа выполняется в тестовом окружении, производится отправка данных в стек ELK;

7) модуль сбора мониторинговой информации `monitoring`, реализованный на C++ и выполняющий предварительную обработку данных об использовании системных ресурсов и метрики работающих компонентов. Для сбора данных использован демон `collectd`, настраиваемый модулем `configurator`. Хранение собранных данных реализовано в СУБД. В случае, когда работа выполняется в тестовом окружении, аналогично производится отправка данных в стек ELK;

8) модуль отправки аналитики и информации о сбоях `telemetry`, реализованный на языке программирования Python и предназначенный для сбора данных журналов о своей работе, а также данных журналов из контейнеров с прочими модулями. Для выполнения сбора и отправки данных на сервер технической поддержки задействуются средства Python `async` через протокол HTTPS в случае, если данные настройки указаны в UI;

9) модуль для ядра ОС, интегрированный с `network` и `monitoring – mod`, реализованный на C и служащий для сбора информации о внутренних структурах данных ядра с последующей передачей ее модулям `network` и `monitoring`. Данный модуль обеспечивает возможность модификации логики работы ядра, непосредственно относящейся к сетевому стеку;

10) библиотеки с общим исходным кодом на c++ и python – `commonlibs`, содержащие повторяющийся в различных модулях код (вынесены в отдельные модули, подключение которых может производиться как `gitsubmodules`);

11) сборщик дистрибутива `installer`. Манифесты для установщика `omnibus`, на базе которых выполняется сборка установочного пакета с алгоритмом, включающие в себя пошаговое описание развертывания и начальной настройки его модулей;

12) тестовые стенды для unit, интеграционного, системного, нагрузочного тестирования, тестирования безопасности testworkbenches. Манифесты для Vagrant для развертывания в виртуальных машинах VirtualBox независимых тестовых окружений для интеграционных, системных, нагрузочных автоматизированных тестов и для автоматизированных тестов безопасности. Для тестирования безопасности выполняется установка фреймворка metasploit и авторской программы Researcher в VirtualBox. Для всех запущенных в окружении компонентов выполняется конфигурирование для отправки данных мониторинга и журналов в стек ELK. Нагрузочное тестирование осуществляется с помощью фреймворка locust;

13) конфигурация для конвейера GitLab – gitlabci manifests. Для каждого модуля составлены соответствующие файлы gitlab-ci.yml. Каждый модуль последовательно проходит следующие этапы: сборка docker-образа на основе Centos/Alpine, добавление в образ исходного кода, установка требуемых apk пакетов и python библиотек, установка в образ фреймворка pytest. Запуск unit тестов для кода модуля. При сборке образа используется генератор манифестов для docker;

14) кроссплатформенное мобильное приложение для управления системой – написано с использованием фреймворка Xamarin.

Была осуществлена интеграция с авторскими наукоемкими решениями (от автоматизированной системы сетевого и системного администрирования операционных систем семейства Windows и Linux до системы интеллектуального контроля и управления доступом к информационным ресурсам персонального компьютера).

Все компоненты были проименованы в соответствии с выполняемым функционалом, написаны на языках программирования Python, C++, C, C#, серверные модули контейнеризованы, а в некоторых случаях и расположены на отдельных виртуальных машинах гипервизора.

Их сетевое взаимодействие осуществляется с использованием API внутри защищенных виртуальных каналов связи. Основные операционные системы серверной части (в том числе управляемого сетевого оборудования) – Centos и AlpineLinux, клиентской части – пользовательские версии семейства Linux, Windows и MacOS.

2. Тестирование предлагаемого решения

Для проверки работоспособности было выполнено ручное и автоматизированное тестирование программной реализации авторской системы интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия (пример представлен на рис. 3).

Было произведено тестирование всех разработанных ролей Ansible. В ходе данного процесса были выполнены следующие действия:

1) для каждой роли, предназначенной для настройки сетевого компонента, был разработан юнит тест (англ. unittesting – модульное тестирование), написанный с использованием фреймворка Testinfra;

2) аспекты компонента, не покрываемые Testinfra, были покрыты с помощью docker-ру и других модулей языка Python, подходящих для тестирования инфраструктуры;

3) непосредственно перед тестом была выполнена сборка образа Docker, запущенного в виртуальной машине Virtualbox, поднимаемой Vagrant. Внутри вирту-

альной машины из образа Docker был запущен контейнер с докеризованным компонентом системы;

```
===== test session starts =====
platform linux -- Python 3.6.8, pytest-5.0.0, py-1.8.0, pluggy-0.12.0
rootdir: /home/ /workspace/ark_gateway/netstack_controller
collected 1115 items

tests/firewall/test_chains.py ..... [ 7%]
tests/firewall/test_controller.py ..... [ 13%]
tests/firewall/test_counters.py ..... [ 22%]
tests/firewall/test_mock.py ..... [ 30%]
tests/firewall/test_policies.py ..... [ 35%]
tests/firewall/test_rollback.py ..... [ 42%]
tests/firewall/test_rules.py ..... [ 48%]
tests/firewall/signatures/test_binmask.py ..... [ 55%]
tests/firewall/signatures/test_heuristic_basic.py ..... [ 62%]
tests/firewall/signatures/test_neural_chunked.py ..... [ 69%]
tests/firewall/signatures/test_neural_pt_base.py ..... [ 74%]
tests/firewall/signatures/test_regex.py ..... [ 81%]
tests/routing/test_ctl.py ..... [ 88%]
tests/routing/test_hdr_parser_wrapper.py ..... [ 95%]
tests/routing/test_rp_wrapper.py ..... [100%]

===== 1115 passed in 186.34 seconds =====
```

Рис. 3. Результат примера выполнения части юнит-тестов Системы с использованием фреймворка pytest

4) далее был выполнен запуск инфраструктурных тестов, которые были пройдены также продуктом целиком. Запуск тестов автоматизирован: для юнит-тестов он выполнялся при каждом внесении изменений в репозиторий Gitlab, для интеграционных тестов – при сборке релиза.

В целях тестирования веб-приложений информационной системы использовался инструмент Selenium для автоматизации действий веб-браузера.

3. Исследование предлагаемого решения

Важно отметить, что не существует полноценного аналога предлагаемого решения, на рынке представлены лишь аппаратно-программные объекты, выполняющие атомарный функционал представленного комплекса. Для исследования эффективности работы СИАУ ИИП был произведен экспериментальный сравнительный анализ с различными существующими решениями: комплексными межсетевыми экранами и маршрутизаторами D-LINK DFL-870, ZYXEL USG210, CISCO ASA5550-DC-K8, Juniper SRX345, Advantech FWA-660, FP-Stonesoft 1100-c1, HN SG-6000-E1600, FG-51E, Sangfor M4500, M5100, MikroTik CCR1036-8G-2S+EM, Huawei USG2260, Kerio Control, часто именуемыми маркетологами NGFW (англ. Next generation firewall) и UTM (англ. Unified threat management), системами обнаружения и предотвращения вторжений Suricata, Wg с общедоступными базами знаний, различными проприетарными инструментами NGIPS (англ. Next-Generation IPS), а также другими инструментами управления трафиком.

Рассматриваемая СИАУ ИИП продемонстрировала отсутствие ограничений на число одновременно поддерживаемых VPN подключений, за исключением лимита вычислительных мощностей сервера, подтвердила отсутствие ограничений на число задаваемых политик и правил. Важно отметить, что практически все альтернативные решения имеют ограничения на количество VPN-туннелей и политик

фильтрации порядка 200 и 2000 соответственно. В авторской Системе эти ограничения снимаются посредством спроектированной архитектуры, выдерживающей высокие нагрузки, а также применением технологии нулевой маршрутизации. Существенными недостатками ряда конкурентов выступали: некриптоустойчивое шифрование (по типу устаревшего алгоритма DES), отсутствие интеграции с оверлейными технологиями и сетями, составление сигнатур и черных списков на стороне серверов правообладателя с последующей синхронизацией перед фильтрацией трафика и многое другое. Это не выдерживает сравнения с авторским гибким многослойным инкапсулированным шифрованием на базе криптоустойчивых алгоритмов, полноценной интеграцией с оверлейными технологиями и автоматическим составлением черных списков с самообучением системы.

В рамках проведения следующего эксперимента были задействованы инструменты пассивного и активного анализа информационных систем: сканеры, зонды и инструменты пентеста. Настройки СИАУ ИИП проиллюстрированы на рис. 4.

Информационная безопасность

Авторские инструменты противодействия механизмам активного и пассивного анализа трафика и информационных ресурсов посредством фальсификации серверных ответов.

Задействовать

Сценарии имитации

Выберите сценарии и задайте ширину диапазона реагирования (0 - 100%).

Активные сценарии

Сценарий	Вероятность	
<input checked="" type="checkbox"/> Ubuntu 18.04	5%	 
<input checked="" type="checkbox"/> macOS High Sierra 10.13.6	19%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Windows Server 2008 R2	32%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Windows Server 2012 R2	9%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Windows 7	11%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Red Hat Enterprise Linux 6.10	3%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Debian 7	13%	 
<input checked="" type="checkbox"/> Хост выключен	8%	 

Рис. 4. Настройка противодействия СИАУ ИИП несанкционированным исследованиям

Использовались следующие программные продукты: Nmap, Nessus, Rapid 7 NeXpose, OpenVAS, X-Scan, XSpider 7, Microsoft BSA, GFI LANguard, RetinaNSA, SAINT и другие средства. Жесткая логика поведения существующих решений поз-

волила идентифицировать их вплоть до версии прошивки и актуальных уязвимостей. Например, обхода аутентификации (CVE-2019-1912). Соответственно, не составляло труда осуществить нарушение штатного режима работы исследуемого узла. СИАУ ИИП была настроена на противодействие подобным нештатным возмущениям.

Для множественных итераций исследования со стороны одного хоста осуществлялась эмуляция одностороннего сценария фальсификации – Windows Server 2008 R2. В целях усложнения эксперимента сканирование и зондирование осуществлялось одним источником с использованием смены личностей (выходных IP-адресов) оверлейной сети TOR (англ. The Onion Router).

При этом СИАУ ИИП однозначно идентифицировала воздействия посредством корреляционного анализа пула адресных пространств, типов исследований, процентов их исчерпания, временных задержек и другой метаинформации. Пример протокола результатов анализа разработанной системы представлен на рис. 5.

CVSS	Plugin	Name
10.0	97833	MS17-010: Security Update for Microsoft Windows SMB Server (4013389) (ETERNALROMANCE) (ETERNALSYNERGY) (WannaCry) (EternalRocks) (Petya)
10.0	108797	Unsupported Windows OS
6.8	90510	MS16-047: Security Update for SAM and LSAD Remote Protocols (3148527)
5.0	57608	SMB Signing not required
N/A	10114	ICMP Timestamp Request Remote Date Disclosure
N/A	10150	Windows NetBIOS / SMB Remote Host Information Disclosure
N/A	10287	Traceroute Information
N/A	10394	Microsoft Windows SMB Log In Possible
N/A	10736	DCE Services Enumeration
N/A	10785	Microsoft Windows SMB NativeLanManager Remote System Information Disclosure
N/A	11011	Microsoft Windows SMB Service Detection
N/A	11219	Nessus SYN scanner
N/A	11936	OS Identification
N/A	12053	Host Fully Qualified Domain Name (FQDN) Resolution

Рис. 5. Пример протокола результатов анализа разработанной системы

Таким образом, источник несанкционированных исследований Системы идентифицировал операционную систему Windows Server 2008 R2 с двумя критическими уязвимостями, подозрений о дезинформации у него и не могло возникнуть. При последующих враждебных действиях он был бы перенаправлен на соответствующий изолированный объект блока фальсификации с отслеживанием действий, автоматическим изучением потенциально новой злоумышленной активности и выработкой стратегии по ее упреждению.

Очередным интересным экспериментом выступила генерация более 5000 распределенных сетевых атак различных типов, совмещенных с полезными тестовыми сигналами, на каждый рассматриваемый продукт в отдельности. Пропускная способность канала связи составляла 1 Гбит/с. При этом применялись оверлейные технологии, сервисы анонимизации (прокси и VPN) и другие инструменты для усложнения анализа и обработки возмущений системами защиты. Таким образом, задействовалось более 20 000 «белых» IP-адресов глобальной сети Интернет. Диаграмма пропускной способности канала связи в интервале проведения атак с 10-й по 50-ю секунды представлена на рис. 6. В рамках соблюдения принципов и норм научной этики существующие альтернативные решения в области управления трафиком, с которыми производилось сравнение, проименованы на диаграмме латинскими буквами: A, B, C, D, E, F, G (было выбрано 7 решений в ценовом диапазоне от 40 000 до 600 000 рублей с учетом аппаратной части).

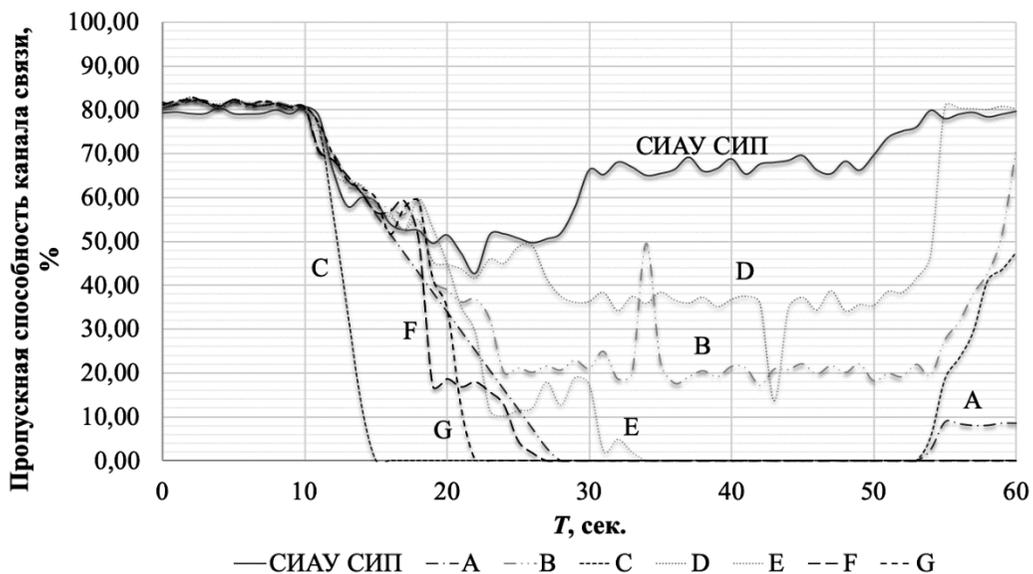


Рис. 6. Сводная диаграмма загрузки канала связи

Разработанная система обеспечила бесперебойную обработку полезных тестовых сигналов в штатном режиме, оптимизировав загрузку каналов связи посредством выработки оптимальных стратегий реагирования на несанкционированные внешние возмущения различных типов и уровней рисков. Даже в штатном режиме работы СИАУ ИИП имитирует работу различных сервисов и служб, генерируя фальшивый трафик в качестве ловушек. По умолчанию процентное отношение такого рода информационных потоков к общему объему трафика не может превышать 2 % (значение в данном интервале выбирается стохастически). Данный

параметр корректируется через панель администрирования. Таким образом, избыточность объема трафика в нормальном режиме работы выступает одним из компонентов стоимости эффективности работы Системы при обработке непредвиденных ситуаций.

Обсуждение результатов и заключение

В ходе работы была спроектирована, программно реализована и исследована система интеллектуально-адаптивного управления информационной инфраструктурой предприятия [16]. Функционирование данной системы осуществляется на основе ранее представленного одноименного метода. СИАУ ИИП обеспечивает надежную, отказоустойчивую и качественную работу ее технических объектов и систем в едином стеке с оптимизацией загрузки каналов связи при различных типах воздействий и инцидентах, самообучается и предоставляет интеллектуальную поддержку при принятии управленческих решений в технических системах в условиях неопределенности.

В рамках ноу-хау программной инженерии ее архитектура была выполнена с использованием платформы автоматизации развертывания и управления приложениями в многослойных инкапсулированных средах виртуализации и изоляции с аналогичным подходом к шифрованию объектов, что обеспечивает дополнительную надежность и отказоустойчивость решений с моментальным восстановлением работоспособности любого компонента даже в случае технического сбоя без последствий для информационной инфраструктуры.

В целях проверки работоспособности было выполнено ручное и автоматизированное тестирование всего программного комплекса. Для исследования эффективности работы Системы был произведен экспериментальный сравнительный анализ с существующими решениями в области управления трафиком и обеспечения сетевой информационной безопасности, которые фактически выполняют лишь атомарный функционал системы (в связи с отсутствием полноценных аналогов).

В сравнении с альтернативными решениями загрузка канала связи в штатном режиме повышается на 0,0001–2 % (издержки противодействия несанкционированным идентификациям и исследованиям технических систем и объектов, параметр настраивается опционально в панели администрирования с выбором сценариев фальсификации доступных шаблонов), при массовых нештатных возмущениях среднего уровня риска снижается в среднем на 27,4 %, а при нештатных воздействиях высокого уровня риска не превышает 70 %, в то время как множество конкурентов переходят в состояние недоступности и не обрабатывают стандартные запросы. Таким образом, повышается пропускная способность для штатных информационных потоков.

Дополнительным преимуществом перед существующими решениями является объединение всей информационной инфраструктуры в единый стек, единую экосистему. Снимаются ограничения на количество задаваемых политик, размеры адресных пулов правил и многое другое.

Цена данных преимуществ – повышенные требования к вычислительным мощностям: DDR4 ECC от 16 ГБ вместо DDR3 2ГБ, Intel Core от i5 вместо i3, SSD 1 Тб вместо HDD 100 ГБ. Другим недостатком является избыточность информации: децентрализованный реестр событий дублируется на всех хостах.

Данные аспекты являются незначительными в сравнении с рентабельностью внедрения Системы, которая выражается в повышении эффективности, надежности, отказоустойчивости и безопасности функционирования технических объектов даже в нештатных ситуациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Yanyan L., Keyu J.* Prospect for the Future Internet: A Study Based on TCP/IP Vulnerabilities. Proceedings of the International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network, Taiyuan, China. 2012. P. 52–55.
2. *Басыня Е.А.* Проблематика управления трафиком вычислительной сети с коммутацией пакетов на основе стека протоколов TCP/IP // *Техника и технология: новые перспективы развития.* 2014. № 15. С. 48–57.
3. *Christoph B., Horst S., Olaf S.* Soft-Error Detection and Correction for Concurrent Data Structures // *Transactions on Dependable and Secure Computing.* 2017. Vol. 14. No. 1. P. 22–36.
4. *Перевоицков В.А.* Обзор уязвимостей программного обеспечения комплексных электронных систем безопасности // *Актуальные научные исследования в современном мире.* 2017. № 3–2 (23). С. 76–77.
5. *Motta R.C., Marcal K.O., Travassos G.H.* Rethinking Interoperability in Contemporary Software Systems. Proceedings of the 5th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and 11th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (JSOS), Buenos Aires, Argentina. 2017. P. 9–15.
6. *James D.A., James B.D.* Applying standard independent verification and validation (IV&V) techniques within an Agile framework: Is there a compatibility issue? Proceedings of the IEEE International Systems Conference (SysCon), Montreal, QC, Canada. 2017. P. 1–5.
7. *Монарев В.А., Пестунов А.И.* Эффективное обнаружение стеганографически скрытой информации посредством интегрального классификатора на основе сжатия данных // *Прикладная дискретная математика.* 2018. № 40. С. 59–71.
8. *Монарев В.А., Пестунов А.И.* Повышение эффективности методов стегоанализа при помощи предварительной фильтрации контейнеров // *Прикладная дискретная математика.* 2016. № 2. С. 87–99.
9. *Пестунов А.И.* О формализации и систематизации основных понятий дифференциального криптоанализа итеративных блочных шифров // *Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы.* 2014. № 3. С. 109–114.
10. *Пестунов А.И., Ковалев В.А.* Определение критической цены продажи технологической машины на рынке оборудования с позиции покупателя // *Вестник НГУЭУ.* 2019. № 1. С. 240–246.
11. *Мутигуллин А.С., Прасолова Е.А.* Обзор методологий разработки корпоративных информационных систем // *Научное обозрение. Технические науки.* 2018. № 6. С. 41–45.
12. *Тайлаков В.А., Израилов К.Е.* Способы автоматизации поиска уязвимостей в программном обеспечении на соответствующих уровнях его разработки // *Научный аспект.* 2018. Т. 6. № 4. С. 719–726.
13. *Gorbacheva A., Smirnov S.* Converging technologies and a modern man: emergence of a new type of thinking. *AI & Society.* 2017. Т. 32. № 3. С. 465–473.
14. *Крохин Г.Д., Аракелян Э.К., Мухин В.С., Пестунов А.И.* Применение методологии искусственного интеллекта для формализации результатов обработки нечеткой информации // *Вестник Московского энергетического института.* 2017. № 5. С. 130–138.
15. *Басыня Е.А., Сафронов А.В.* Децентрализованный подход к сбору и обработке данных информационной инфраструктуры предприятия // *Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере.* 2019. № 3 (33). С. 43–54.
16. *Басыня Е.А.* Система интеллектуально-адаптивного управления сетевой инфраструктурой предприятия // *Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019660561 РФ, опубл. 07.08.2019. РОСПАТЕНТ.*

Статья поступила в редакцию 27 января 2020 года

SOFTWARE IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF THE SYSTEM FOR INTELLECTUALLY ADAPTIVE MANAGEMENT OF THE ENTERPRISE INFORMATION INFRASTRUCTURE

E.A. Basinya

Novosibirsk State Technical University, Research Institute of Information and Communication Technologies
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract. *The paper describes the problems of information and communication interaction of technical objects and systems. The vulnerabilities of the TCP / IP protocol stack, the imperfection of operating systems and application software, the complexity of full mutual integration of various systems are analyzed. The consequence of saving vendors of network solutions on computing power in the form of architectural constraints and vulnerabilities is described. The design, software implementation and experimental study of the author's system of intellectually adaptive management of the enterprise's information infrastructure, which operates on the basis of the previously presented method of the same name, is considered. A modern technology stack is used in combination with a flexible development methodology. The scientific novelty of the work lies in the proposed architecture of a comprehensive software product for managing the enterprise information infrastructure. Improving the efficiency, reliability, security and fault tolerance of the operation of technical objects and systems is achieved by using the automation platform for deploying and managing applications in a multi-layer virtualization environment. Isolation of work services is carried out with the ability to automatically restart any component without violating the normal operating mode of the infrastructure. A number of restrictions inherent in existing solutions, such as the number of simultaneously supported VPN connections, as well as defined policies and rules are removed. Increasing the level of confidentiality of network interaction, as well as countering anonymous unauthorized disturbances, is achieved by full integration with overlay technologies and networks, and also by supporting a wide range of modern cryptographic encryption algorithms with the possibility of multi-layer encapsulation. In order to evaluate the effectiveness of the developed system, an experimental comparative analysis is presented with various existing solutions: comprehensive firewalls, routers, intrusion detection and prevention systems, as well as other traffic management tools.*

Keywords: *intellectually adaptive management, system analysis, processing, network traffic, local information processes, TCP / IP, IDS / IPS, SIEM, UTM, NGFW.*

REFERENCES

1. *Yanyan L., Keyu J.* Prospect for the Future Internet: A Study Based on TCP/IP Vulnerabilities // *Proceedings of the International Conference on Computing, Measurement, Control and Sensor Network*, Taiyuan, China, 2012, pp. 52–55.
2. *Basinya E.A.* Packet-switched computing network traffic management issues based on the TCP/IP protocol stack. *Texnika i texnologiya: novy'e perspektivy` razvitiya*, 2014, no. 15, pp. 48–57 (in Russian).
3. *Christoph B., Horst S., Olaf S.* Soft-Error Detection and Correction for Concurrent Data Structures. *Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2017, vol. 14, no. 1, pp. 22–36.
4. *Perevoshnikov V.A.* Integrated Electronic Security Software Vulnerability Overview. *Aktual'ny'e nauchny`e issledovaniya v sovremennom mire*, 2017, no. 3–2 (23), pp. 76–77 (in Russian).
5. *Motta R.C., Marcal K.O., Travassos G.H.* Rethinking Interoperability in Contemporary Software Systems. *Proceedings of the 5th International Workshop on Software Engineering for Systems-of-Systems and 11th Workshop on Distributed Software Development, Software Ecosystems and Systems-of-Systems (JSOS)*, Buenos Aires, Argentina, 2017, pp. 9–15.

Evgeny A. Basinya (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

6. James D.A., James B.D. Applying standard independent verification and validation (IV&V) techniques within an Agile framework: Is there a compatibility issue? *Proceedings of the IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Montreal, QC, Canada. 2017, pp. 1–5.
7. Monarev V.A., Pestunov A.I. Effective detection of steganographically hidden information by means of an integrated classifier based on data compression. *Prikladnaya diskretnaya matematika*. 2018, no. 40, pp. 59–71 (in Russian).
8. Monarev V.A., Pestunov A.I. Improving the effectiveness of steganalysis methods by pre-filtering containers. *Prikladnaya diskretnaya matematika*. 2016, no. 2, pp. 87–99 (in Russian).
9. Pestunov A.I. On the formalization and systematization of the basic concepts of differential cryptanalysis of iterative block ciphers. *Problemy` informacionnoj bezopasnosti. Komp`yuterny`e sistemy`*. 2014, no. 3, pp. 109–114 (in Russian).
10. Pestunov A.I., Kovalev V.A. Determination of the critical selling price of a technological machine in the equipment market from a buyer's perspective. *Vestnik NGUE`U*. 2019, no. 1, pp. 240–246 (in Russian).
11. Mutigullin A.S., Prasolova E.A. Overview of corporate information systems development methodologies. *Nauchnoe obozrenie. Texnicheskie nauki*. 2018, no. 6, pp. 41–45 (in Russian).
12. Tajlakov V.A., Izrailov K.E. Ways to automate the search for vulnerabilities in software at appropriate levels of its development. *Nauchny`j aspekt*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 719–726 (in Russian).
13. Gorbacheva A., Smirnov S. Converging technologies and a modern man: emergence of a new type of thinking. *AI & Society*. 2017, vol. 32, no. 3, pp. 465–473.
14. Kroxin G.D., Arakelyan E`K., Muxin V.S., Pestunov A.I. The use of artificial intelligence methodology for the formation of fuzzy information processing results. *Vestnik Moskovskogo e`nergeticheskogo instituta. Vestnik ME`I*. 2017, no. 5, pp. 130–138 (in Russian).
15. Basinya E.A., Safronov A.V. Decentralized approach for collecting and processing data of the enterprise information infrastructure. *Vestnik UrFO. Bezopasnost` v informacionnoj sfere*. 2019, No. 3 (33), pp. 43–54 (in Russian).
16. Basinya E.A. System for intellectually adaptive management of the enterprise network infrastructure. *State registration of an intellectual property object (computer programs) № 2019660561 RF*, publicati.

УДК 519.233.5

ОПЕРАТИВНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

А.В. Бурцев, А.Л. Евелев, В.П. Качалин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы прогнозирования макроэкономических процессов с помощью математического моделирования, а именно производственной функции Кобба – Дугласа, для эффективного управления отраслевой политикой предприятий металлургической и электротехнической отраслей Самарской области. Проведено оперативное математическое моделирование, не требующее значительных вычислительных ресурсов и позволяющее многократно прогнозировать результаты управленческих решений по ходу их практического формирования. Рассмотрено влияние заработной платы сотрудников и их численности на выпуск продукции в данных отраслях. В ходе исследования построены модели – как с учетом научно-технического прогресса, так и без него. Верификация полученных моделей осуществлена с помощью коэффициента детерминации, а также критериев Фишера, Стьюдента и Дарбина – Уотсона. Сделаны выводы о качестве построенных моделей.*

***Ключевые слова:** электротехническая отрасль, металлургическая отрасль, математическая модель, производственная функция Кобба – Дугласа, эластичность, критерий Фишера, t-критерий Стьюдента, критерий Дарбина – Уотсона.*

Самарская область – развитый промышленный регион Российской Федерации. Среди основных отраслей промышленности Самарской области – машиностроение, металлообработка, топливная, химическая и нефтехимическая, электроэнергетическая, цветная металлургия и др. В Самарской области функционируют около 400 крупных и свыше 4 тыс. малых предприятий.

Для эффективного управления отраслевой политикой, и прежде всего для рационального формирования областного бюджета и бюджетов предприятий, необходимо строить обоснованные прогнозы. Для этого используется математическое моделирование макроэкономических процессов в этих отраслях, причем особенно актуальным является оперативное моделирование, не требующее значительных вычислительных ресурсов и позволяющее многократно прогнозировать результаты управленческих решений по ходу их практического формирования.

Ввиду того, что металлургическая промышленность является базисом большинства промышленных отраслей, а электротехническая промышленность – одна

Бурцев Александр Владимирович, ассистент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Евелев Александр Львович, старший преподаватель ассистент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

Качалин Валерий Петрович, ассистент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов».

из наиболее наукоемких отраслей экономики, в статье рассмотрены математические модели металлургического и электротехнического секторов промышленности Самарской области.

Предлагаемые математические модели в форме производственной функции Кобба – Дугласа [1, 2, 3] связывают стоимость выпущенных (отгруженных) товаров в электротехнической и металлургических отраслях промышленности Самарской области $Y(t)$ с двумя основными производственными факторами: заработной платой $K(t)$, отражающей квалификацию персонала, и среднегодовой численностью сотрудников предприятий отрасли $L(t)$, включая малоквалифицированную рабочую силу:

$$Y(t) = AK(t)^\alpha L(t)^\beta e^{\gamma(t-t_1)}. \quad (1)$$

Здесь A – технологический коэффициент;

t – время (годы);

t_1 – начало исследуемого периода (2006 г.);

α – коэффициент эластичности влияния среднемесячной заработной платы;

β – коэффициент эластичности влияния среднегодовой численности работников;

γ – темп прироста выпуска за счет научно-технического прогресса (НТП).

В табл. 1 представлены статистические данные по электротехнической и металлургической отраслям за период 2006–2018 гг. [4].

Сглаживание исходных данных производится методом скользящего среднего [5, 6].

Неизвестные параметры A , α , β , γ определяются методом наименьших квадратов [7, 8, 9]. Для использования математического аппарата линейного регрессионного анализа зависимость (1) прологарифмирована:

$$y_i = a + \alpha k_i + \beta l_i + \gamma i \quad (2)$$

и выбран период дискретизации времени 1 год: $t = t_i$, $i = \overline{1,13}$, $t_1 = 2006$, $t_2 = 2007 \dots$, $y_i = \ln Y(t_i)$, $k_i = \ln K(t_i)$, $l_i = \ln L(t_i)$, $a = \ln A$.

Таблица 1

Входные и выходные параметры модели (1)

Порядковый номер (i)	Период (t _i)	Электротехническая отрасль			Металлургическая отрасль		
		Стоимость отгруженных товаров, млн руб. (Y)	Средняя заработная плата, тыс. руб. (K)	Среднегодовая численность работников, тыс. чел. (L)	Стоимость отгруженных товаров, млн руб. (Y)	Средняя заработная плата, тыс. руб. (K)	Среднегодовая численность работников, тыс. чел. (L)
1	2006	25 798,9	10,350	21,2	37 104,7	10,828	22,7
2	2007	34 008,5	12,972	21,4	41 780,9	13,275	26,5
3	2008	39 480,1	15,098	20,5	50 555,2	15,537	27,4
4	2009	28 946,9	15,490	18,2	37 546,7	15,530	24,6
5	2010	40 726,2	18,238	21,4	57 971,1	16,891	20,0
6	2011	50 709,8	20,101	23,2	65 429,5	19,805	21,7

Порядковый номер (i)	Период (t _i)	Электротехническая отрасль			Металлургическая отрасль		
		Стоимость отгруженных товаров, млн руб. (Y)	Средняя заработная плата, тыс. руб. (K)	Среднегодовая численность работников, тыс. чел. (L)	Стоимость отгруженных товаров, млн руб. (Y)	Средняя заработная плата, тыс. руб. (K)	Среднегодовая численность работников, тыс. чел. (L)
7	2012	53 769,8	21,667	23,8	66 142,5	21,815	23,0
8	2013	49 709,3	23,572	22,8	65 661,2	24,480	23,6
9	2014	51 096,5	25,305	20,8	69 317,0	27,320	23,0
10	2015	53 289,9	27,442	23,7	78 845,9	27,992	29,0
11	2016	45 396,0	29,951	24,3	98 271,1 8	32,875	29,3
12	2017	47 298,4	34,440	19,8	94 700,0	36,748	27,6
13	2018	40 772,1	32,076	19,1	107 168, 7	41,890	28,4

На основе статистической информации построено несколько частных математических моделей:

– модель с несглаженными данными электротехнической отрасли (рис. 1) и металлургической отрасли (рис. 5) ($\gamma=0$);

– модель со сглаженными данными электротехнической отрасли (рис. 2) и металлургической отрасли (рис. 6) ($\gamma=0$);

– модель с несглаженными данными электротехнической отрасли (рис. 3) и металлургической отрасли (рис. 7) с учетом НТП ($\gamma\neq 0$);

– модель со сглаженными данными электротехнической отрасли (рис. 4) и металлургической отрасли (рис. 8) с учетом НТП ($\gamma\neq 0$).

На рис. 1–8 статистические данные отображены точками, результаты моделирования – сплошной линией.

Верификация модели производится по следующим статистическим критериям [10, 11]:

1. Оценка статистической значимости коэффициентов регрессионных уравнений производится на основе расчета t-статистики Стьюдента. Для каждого коэффициента аппроксимации (2) a , α , β , γ , вычисляется значение t-статистики:

$$t_j = \frac{\xi_j}{\sqrt{D_j}}, \quad \xi_1 = a, \quad \xi_2 = \alpha, \quad \xi_3 = \beta, \quad \xi_4 = \gamma,$$

где $D_j = \frac{W_{jj}}{T-n-1} \sum_{i=1}^T \varepsilon_i^2$ – величина дисперсии значений ξ_j ;

n – количество коэффициентов множественной линейной регрессии;

$T=13$ – объем выборки,

$\varepsilon_i = y_i - y_{mi}$ – невязка между фактическим значением y_i и расчетным значением y_{mi} , рассчитанным с помощью модели (2) в момент времени t_i , $i = \overline{1,13}$,

W_{jj} – диагональный элемент матрицы $(X^T X)^{-1}$, где X – матрица исходных данных [7].

В число n коэффициентов линейной регрессии (2) для модели (2) входят α , β , γ , но не входит коэффициент a , поэтому в случае $\gamma=0$ $n=2$, а в случае $\gamma\neq 0$ $n=3$.

В модели (2) без учета НТП ($\gamma=0$) матрица исходных данных X образована слиянием 3 векторов-столбцов [7]. Все элементы первого вектора равны 1, i -тый элемент второго вектора равен k_i , i -тый элемент третьего вектора равен l_i .

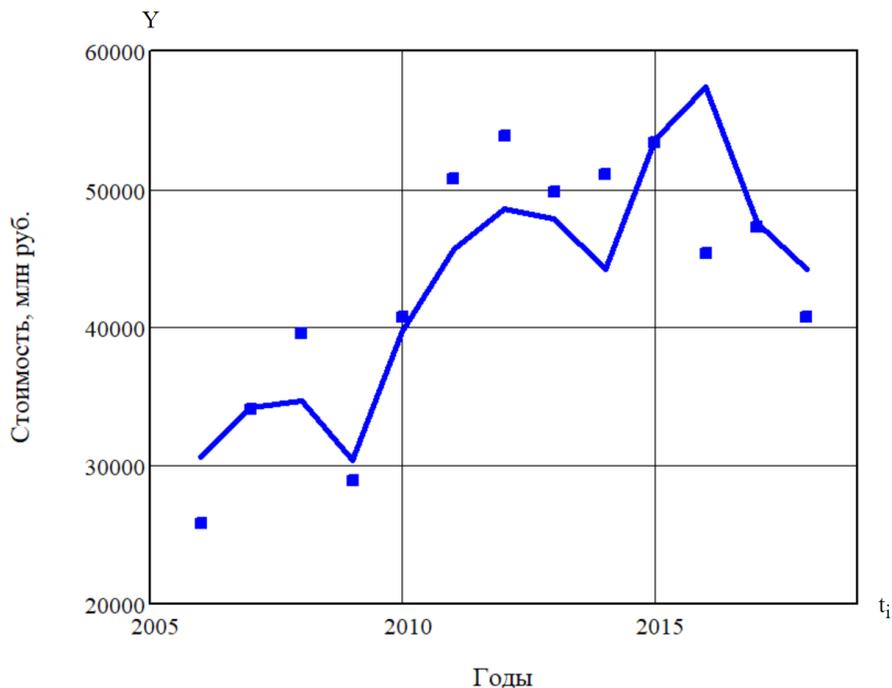


Рис. 1. Стоимость выпущенной продукции электротехнической отрасли (несглаженные данные)

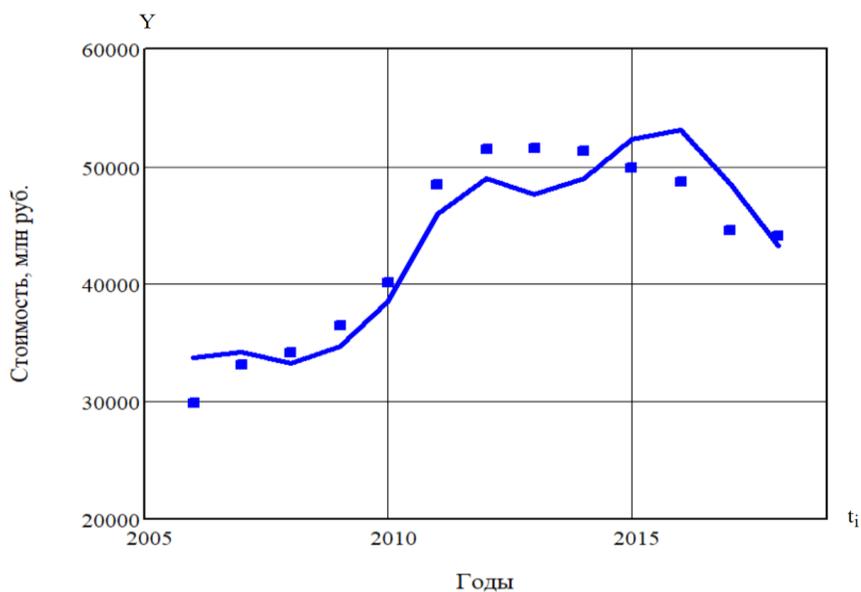


Рис. 2. Стоимость выпущенной продукции электротехнической отрасли (сглаженные данные)

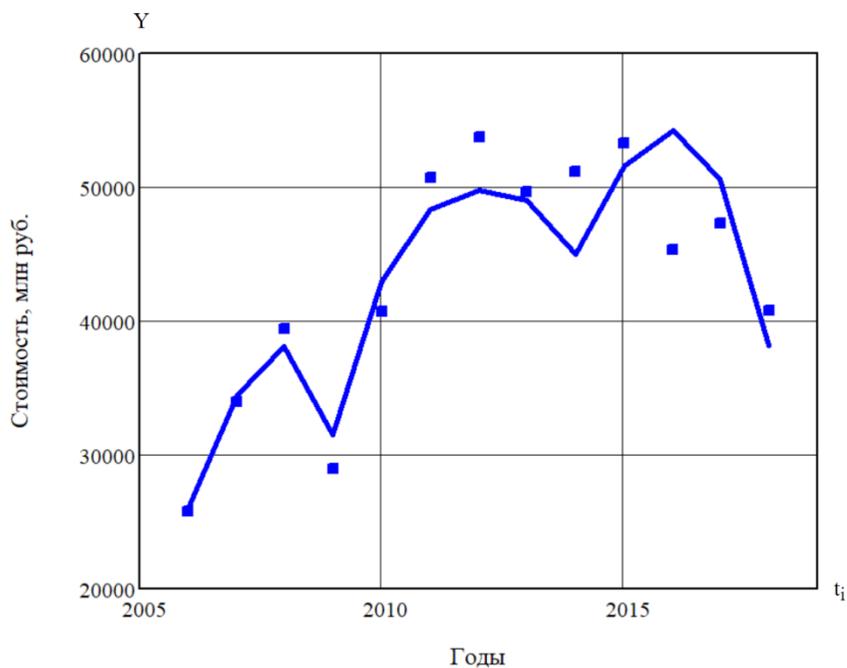


Рис. 3. Стоимость выпущенной продукции электротехнической отрасли с учетом НТП (несглаженные данные)

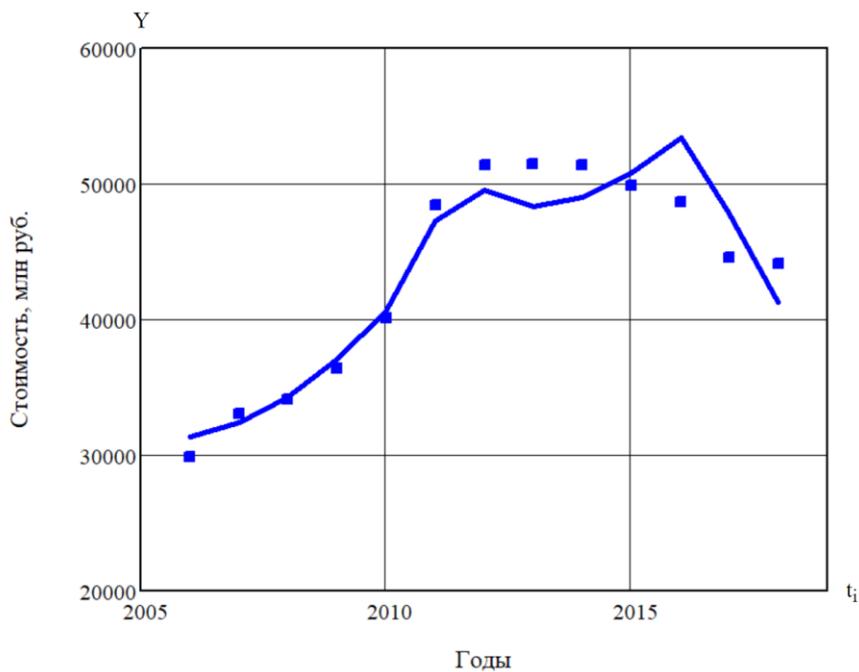


Рис. 4. Стоимость выпущенной продукции электротехнической отрасли с учетом НТП (сглаженные данные)

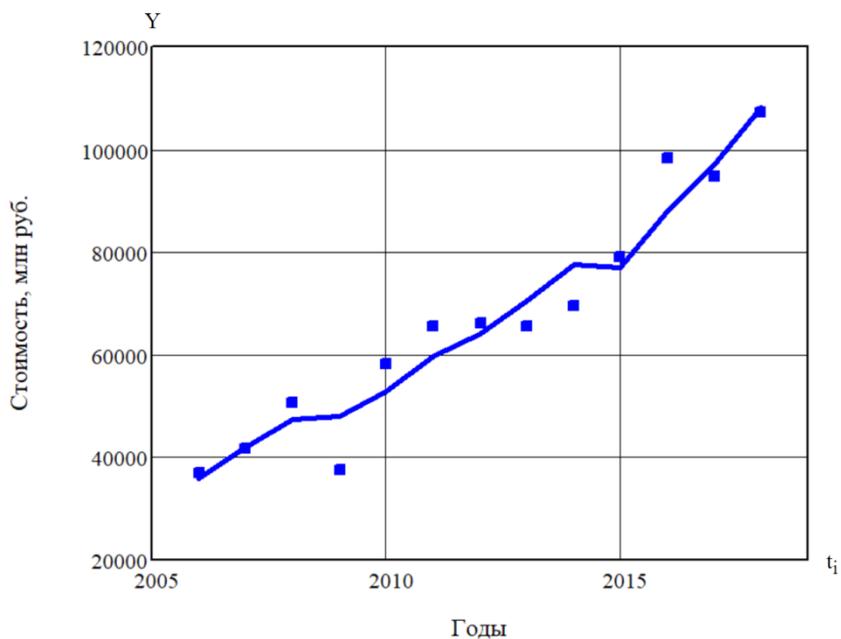


Рис. 5. Стоимость выпущенной продукции металлургической области (несглаженные данные)

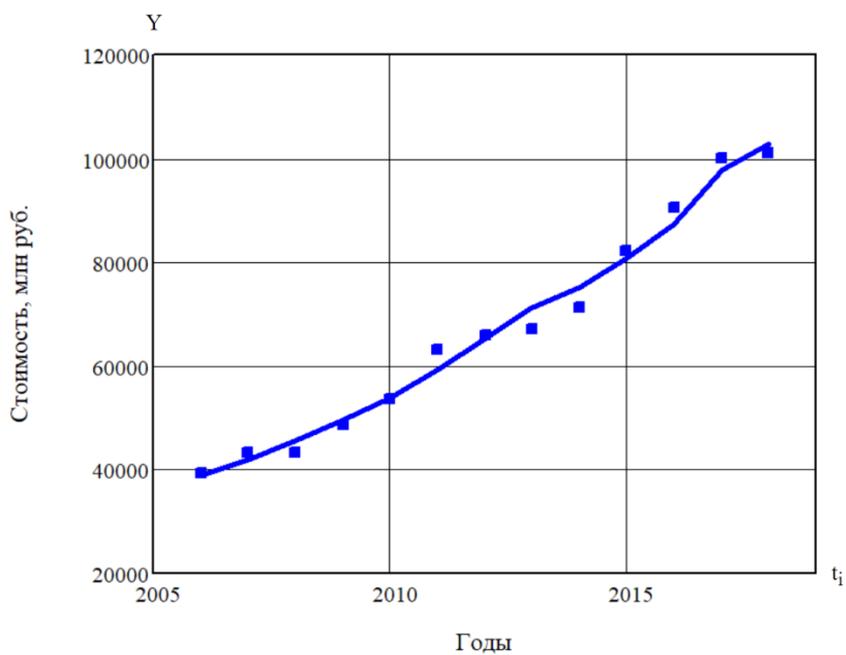


Рис. 6. Стоимость выпущенной продукции металлургической отрасли (сглаженные данные)

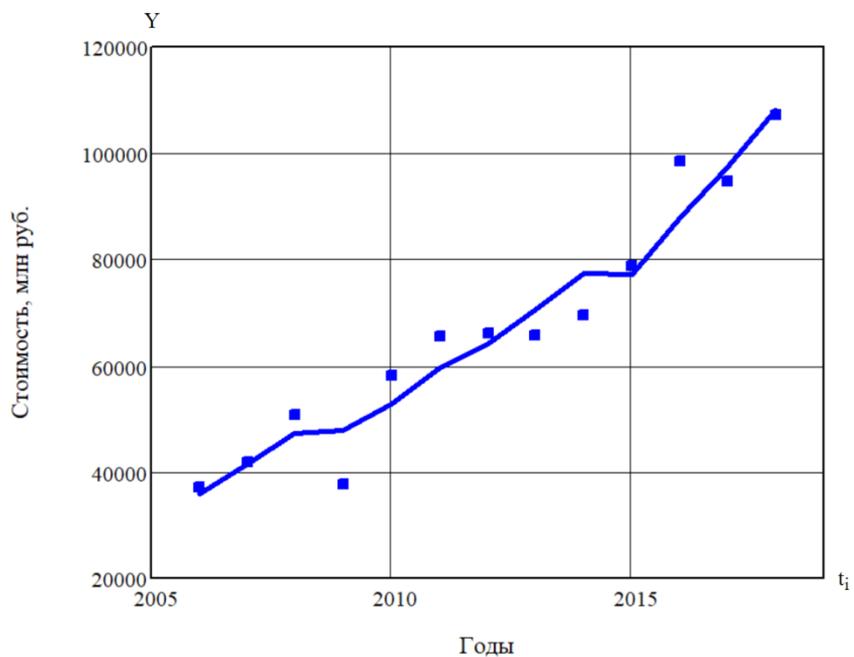


Рис. 7. Стоимость выпущенной продукции металлургической отрасли с учетом НТП (несглаженные данные)

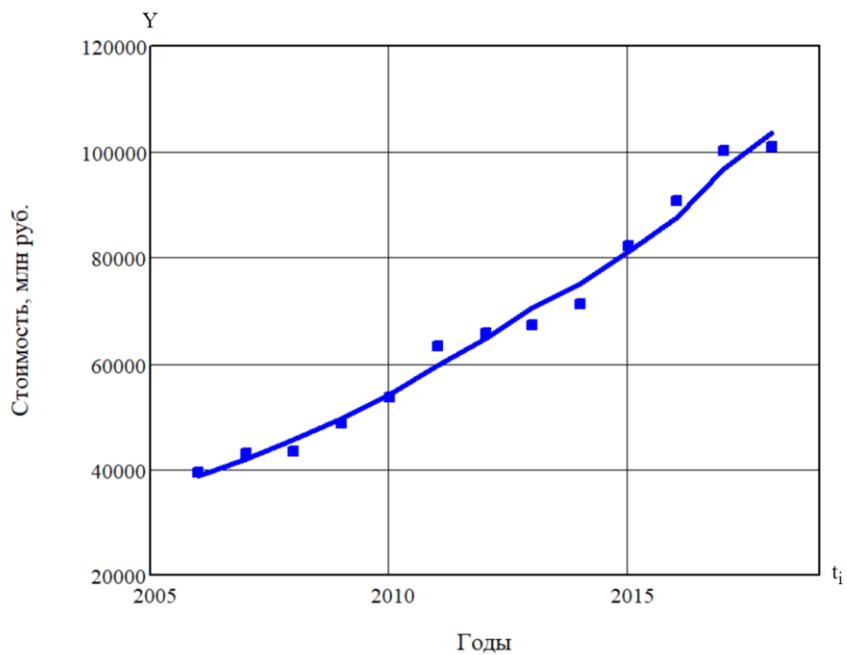


Рис. 8. Стоимость выпущенной продукции металлургической отрасли с учетом НТП (сглаженные данные)

$$X = \begin{bmatrix} 1 & k_1 & l_1 \\ 1 & k_2 & l_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & k_T & l_T \end{bmatrix}$$

В модели (2) с учетом НТП ($\gamma \neq 0$) матрица X образована слиянием 4 векторов-столбцов, первые 3 из которых формируются так же, как и в предыдущем случае, i -тый элемент четвертого вектора равен $(i-1)$.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & k_1 & l_1 & 0 \\ 1 & k_2 & l_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & k_T & l_T & T-1 \end{bmatrix}$$

Для моделей (2) без учета НТП число степеней свободы распределения Стьюдента $K=T-n-1=10$, для моделей (2) с учетом НТП $K=9$.

Значимость коэффициентов линейной регрессии (2) оценивается абсолютной величиной критерия Стьюдента: если $0 < |t| < 1$ – критерий незначим, если $1 \leq |t| < 2$ – более или менее значим, если $2 \leq |t| < 3$ – весьма значим, если $|t| \geq 3$ – существенно значим.

В рассматриваемых моделях квантили распределения Стьюдента $t_{0,05;K}$ для 0,05-квантиля (5%-й уровень значимости) равны соответственно $t_{0,05;10} = 2,228$, $t_{0,05;9} = 2,262$ [5], следовательно, при 5%-м уровне значимости и двусторонней альтернативной гипотезе критическое значение t -статистики практически равняется 2 [10, 13].

2. Коэффициент детерминации R^2 , который является квадратом коэффициента множественной корреляции, определяет долю дисперсии выходной переменной, объясненной с помощью линейной регрессии (2). Этот показатель измеряет меру зависимости вариации одной величины от многих других. Он может принимать значения в пределах от 0 до 1. Чем ближе его значение к 1, тем связаннее результирующий признак с исследуемыми факторами [10, 14]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^T (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\bar{y} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T y_i$ – среднее значение y .

3. Статистическая значимость коэффициента детерминации R^2 проверяется нулевой гипотезой для F -статистики Фишера [5, 15] $F = \frac{R^2}{1-R^2} \frac{T-n-1}{n}$ по таблицам критических значений для различных уровней значимости α и степеней свободы $v_1 = n$, $v_2 = T - n - 1$.

Для 3-параметрической модели (1) без учета НТП ($\gamma=0$) $n=2$, $T=13$, следовательно, $v_1=2$, $v_2=10$. Тогда критическое значение $F_{0,05;2;10}=4,10$ [5].

Для 4-параметрической модели (2) с учетом НТП ($\gamma \neq 0$) $n=3$, $T=13$, следовательно, $v_1=3$, $v_2=9$. Тогда критическое значение $F_{0,05;3;9}=3,86$ [5].

Обе эти величины позволяют оценить достоверность моделей.

4. Основным требованием к невязкам ε_i , $i=1, \dots, T$ является их статистическая независимость друг от друга. Для анализа независимости отклонений использована статистика Дарбина – Уотсона, рассчитываемая по формуле [15, 16]

$$DW = \frac{\sum_{i=1}^{T-1} (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^T \varepsilon_i^2}.$$

Статистика Дарбина – Уотсона применяется здесь для проверки гипотезы об отсутствии автокорреляции остатков ε_i первого порядка.

Для статистики Дарбина – Уотсона существуют два критических значения, меньшие двух: нижнее d_L и верхнее d_U . Если значение статистики Дарбина – Уотсона принадлежит интервалу $(0; d_L)$, то имеет место положительная автокорреляция остатков, что означает направленное постоянное воздействие некоторых не учтенных в регрессии факторов. Если значение Дарбина – Уотсона находится в интервале $(4-d_U; 4)$, то существует отрицательная автокорреляция, которая означает, что за положительным отклонением следует отрицательное, и наоборот. Если статистика Дарбина – Уотсона близка к двум, то есть принадлежит интервалу $(d_U; 4-d_U)$, то отклонения от регрессии считают случайными и автокорреляция остатков отсутствует [10].

Для 3-параметрической модели (1) без учета НТП ($\gamma=0$) при уровне значимости 5 %, $T=13$, $n=2$ границы $d_L=0,86$ и $d_U= 1,56$ [12].

Для 4-параметрической модели (2) с учетом НТП ($\gamma\neq 0$) при уровне значимости 5 %, $T=13$, $n=3$ границы $d_L= 0,72$ и $d_U= 1,82$ [12].

В табл. 2 и 3 сведены полученные значения параметров модели, а также оценки качества каждой из моделей.

Таблица 2

Характеристики и параметры моделей электротехнической отрасли

Показатели		Модель с несглаженными данными	Модель со сглаженными данными	Модель с несглаженными данными с учетом НТП	Модель со сглаженными данными с учетом НТП	
Параметры модели	A	270,358	105,124	30,115	18,183	
	α	0,435	0,375	1,744	1,894	
	β	1,216	1,585	0,92	0,96	
	γ	–	–	-0,125	-0,135	
Критерии качества модели	R^2	0,768	0,883	0,883	0,931	
	F	16,513	37,747	22,658	40,331	
	DW	1,537	0,685	1,656	1,255	
	Дисперсии	Da	1,529	1,154	1,396	1,255
		D α	0,0097	0,004	0,198	0,374
		D β	0,165	0,129	0,102	0,148
		D γ	–	–	0,002	0,003
	Критерий Стьюдента	Ta	4,529	4,333	2,881	2,589
		T α	4,409	6,215	3,917	3,097
		T β	2,997	4,409	2,885	2,498
		T γ	–	–	-2,982	-2,491

Характеристики и параметры моделей металлургической отрасли

Показатели		Модель с несглаженными данными	Модель со сглаженными данными	Модель с несглаженными данными с учетом НТП	Модель со сглаженными данными с учетом НТП	
Параметры модели	A	6958,288	7708,92	$6,942 \times 10^3$	$2,012 \times 10^4$	
	α	0,836	0,836	0,837	0,402	
	β	-0,113	-0,145	-0,113	-0,121	
	γ	–	–	-0,002	0,043	
Критерии качества модели	R ²	0,922	0,986	0,922	0,987	
	F	59,429	357,932	35,657	220,457	
	DW	2,411	1,645	2,411	1,66	
	Дисперсии	Da	0,691	0,185	3,71	4,106
		D α	0,007	0,001	0,684	0,803
		D β	0,083	0,022	0,096	0,026
		D γ	–	–	0,007	0,008
	Критерий Стьюдента	T α	10,645	20,836	4,592	4,89
		T α	9,715	23,023	1,012	0,448
		T β	-0,393	-0,972	-0,365	-0,746
		T γ	–	–	-0,001	0,485

Сглаживание данных приводит к снижению прогностических свойств, что демонстрирует изменение значений критерия Дарбина – Уотсона (DW); несмотря на это качество модели исходя из коэффициента детерминации (R²) и критерия Фишера (F) меняется незначительно, оставаясь на достаточно высоком уровне.

Из полученных расчетов и критериев оценки качества моделей следует, что модели, построенные с помощью производственной функции Кобба – Дугласа, достаточно хорошо описывают динамику выпуска товаров электротехнической и металлургической отраслей.

Результаты математического моделирования состояния электротехнической отрасли демонстрируют, что среднегодовая численность работников в этой отрасли оказывает несколько большее влияние на стоимость отгруженных товаров, чем среднемесячная заработная плата ($\beta > \alpha$). Это отражает достаточно широкое использование неквалифицированной рабочей силы, что свидетельствует о недостаточно высокой наукоемкости и недостатке инновационных технологий в электротехнической отрасли Самарской области. Математическое моделирование состояния металлургической отрасли показывает, что увеличение численности работников не приводит к увеличению выпуска товара ($\beta > \alpha$), причем самый низкий коэффициент эластичности наблюдается в модели со сглаженными данными без учета НТП ($\gamma=0$), на основании чего можно сделать вывод об экстенсивной тенденции в развитии отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлин С. Математические методы в теории игр, программировании и экономике. М.: Мир, 1964. 835 с.
2. Кубонива М., Табата М., Табата С., Хасэбэ Ю. Математическая экономика на персональном компьютере / Пер. с яп. Д.М. Демченко, И.В. Белова. М.: Финансы и статистика, 1991. 303 с.
3. Малугин В.А. Математический анализ для экономистов: учебник и практикум для СПО. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2018. – 557 с.
4. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 27 февраля 2019 г.).
5. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.
6. Gujarati, Damodar N.; Porter, Dawn C. Basic Econometrics (Fifth ed.). New York: McGraw-Hill/Irwin, 2009. 922 p.
7. Дилigenский Н.В., Цапенко М.В., Гаврилова А.А. Математические модели управления производственно-экономическими системами. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2005. 112 с.
8. Chatterjee, Sampit; Simonoff, Jeffrey. Handbook of Regression Analysis. John Wiley & Sons, 2013. 295 p.
9. Ковалев Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика для экономистов: учебник и практикум для бакалавриата, специалитета и магистратуры / под общ. ред. Г.А. Медведева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2019. – 284 с.
10. Замков О.О., Толстомятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике. М.: МГУ, ДИС, 1997. 368 с.
11. Dougherty, Christopher. Introduction to Econometrics (Fourth ed). Oxford University Press, New York – Oxford, 2011. 573 p.
12. Durbin Watson Test & Test Statistic. URL: <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/durbin-watson-test-coefficient/> (дата обращения: 5 февраля 2020 г.).
13. Карасёв А.И., Кремер Н.Ш., Савельева Т.И. Математические методы и модели в планировании. М.: Экономика, 1987. 240 с.
14. Кремер Н.Ш., Путько Б.А. Эконометрика: Учебник для вузов / Под ред. проф. Н.Ш. Кремера. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. 311 с.
15. Renshaw, Geoffrey, Ireland, Norman J. Maths for Economics. New York: Oxford University Press, 2005. 876 p.
16. Лотов А.В. Введение в экономико-математическое моделирование. М.: Наука, 1984. 392 с.
17. Елисеева И.И. Эконометрика: учебник для магистров / Под ред. И.И. Елисеевой. М.: Юрайт, 2014. 453 с.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2020 года

OPERATIVE MATHEMATICAL MODELING OF ELECTROTECHNICAL AND METALLURGICAL INDUSTRIES OF THE SAMARA REGION

A.V. Burtsev, A.L. Yevelev, V.P. Kachalin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the problems of forecasting the macroeconomic processes using mathematical modeling, namely the Cobb-Douglas production function, for the effective management of the sectoral policy of enterprises in metallurgical and electrical industries of the Samara region. An operative mathematical modeling that does not require great computational resources was carried out. It also allows repeatedly predicting the results of*

*Alexander V. Burtsev, Assistant.
Alexander L. Yevelev, Senior Lecture.
Valery P. Kachalin, Assistant.*

managerial decisions in practice. The impact of the number of employees and their salaries on the output in these sectors is considered. During the study period, the authors built models both taking into account scientific and technological progress and without it. The verification of the models obtained was carried out using the coefficient of determination, as well as the Fisher test, Student t-test, and Durbin-Watson criterion. The conclusions were made about the quality of the constructed models.

Keywords: *electrical industry, metallurgical industry, mathematical model, Cobb–Douglas production function, elasticity, F-test, Student's t-test, Durbin–Watson statistic.*

REFERENCES

1. *Karlin S.* Mathematical Methods and Theory in Games, Programming, and Economics. London, Pergamon Press, 1959. 840 p.
2. *Kuboniwa M., Tabata M., Tabata S., Hasebe Yu.* Matematicheskaya ekonomika na personal'nom komp'yutere [Mathematical Economics on a Personal Computer]. – Moscow, Finansy i statistika, 1991. 303 p. (In Russian).
3. *Malugin V.A.* Mathematical analysis for economists: a textbook and workshop for open source software. 3rd ed., Revised. and add. M.: Yurayt Publishing House, 2018. 557 p.
4. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal State Statistics Service]. – <http://www.gks.ru/> (accessed February 27, 2019) (In Russian).
5. *Ayvazyan S.A., Mkhitaryan V.S.* Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki [Applied statistics and the basics of econometrics]. Moscow, Unity, 1998. 1022 p. (In Russian).
6. *Gujarati, Damodar N.; Porter, Dawn C.* Basic Econometrics (Fifth ed.). New York: McGraw-Hill/Irwin, 2009. 922 p.
7. *Diligenskiy N.V., Tsapenko M.V., Gavrilova A.A.* Matematicheskie modeli upravleniya proizvodstvenno-ekonomicheskimi sistemami [Mathematical management models of industrial and economic systems]. Samara, Samar. State Tech. Univ., 2005. 112 p. (In Russian).
8. *Chatterjee, Samprit; Simonoff, Jeffrey.* Handbook of Regression Analysis. John Wiley & Sons, 2013. 295 p.
9. *Kovalev E.A.* Probability Theory and Mathematical Statistics for Economists: a textbook and workshop for undergraduate, specialty, and master programs. Under the general. ed. G.A. Medvedev. 2nd ed., Rev. and add. M.: Yurayt Publishing House, 2019. 284 p.
10. *Zamkov O.O., Tolstopyatenko A.V., Cheremnykh Yu.N.* Matematicheskie metody v ekonomike [Mathematical methods in economics]. Moscow, Moscow State University, DIS, 1997. 368 p. (In Russian).
11. *Dougherty, Christopher.* Introduction to Econometrics (Fourth ed). Oxford University Press, New York – Oxford, 2011. 573 p.
12. Durbin Watson Test & Test Statistic. URL: <https://www.statisticshowto.datasciencecentral.com/durbin-watson-test-coefficient/> (accessed February 5, 2020).
13. *Karasev A.I., Kremer N.Sh., Savelyeva T.I.* Matematicheskie metody i modeli v planirovanii [Mathematical methods and models in planning]. Moscow, Economics, 1987. 240 p. (In Russian).
14. *Kremer N.Sh., Putko B.A.* Ekonometrika: Uchebnik dlya vuzov [Econometrics: Textbook for universities]. Ed. prof. N.Sh. Kremer. Moscow, UNITY-DANA, 2002. 311 p. (In Russian).
15. *Renshaw, Geoffrey, Ireland, Norman J.* Maths for Economics. New York: Oxford University Press, 2005. 876 p.
16. *Lotov A.V.* Vvedenie v ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie [Introduction to the economic and mathematical modeling]. Moscow, Nauka, 1984. 392 p. (In Russian).
17. *Yeliseyeva I.I.* Ekonometrika: uchebnik dlya magistrrov [Econometrics: A Textbook for Masters]. Ed. I.I. Yeliseyeva. Moscow, Yurayt, 2014. 453 p. (In Russian).

УДК 519.216

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МОМЕНТОВ ДВОИЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ*

В.М. Кузнецов, В.А. Песошин, А.И. Гумиров, Д.В. Ширишова

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

E-mail: kuznet_evm@mail.ru, pesoshin-kai@mail.ru, neporebrik@mail.ru, einstein_darya@mail.ru

Аннотация. Обоснована применимость статистического метода определения значимой однородности двоичных последовательностей в соответствии с вероятностными моментами любого конечного порядка для решения задач математического моделирования стохастических объектов. Описаны подходы к построению критерия однородности в условиях разнообразных способов задания вероятностных моментов. Выявлены существенные отличия разложений центральных вероятностных моментов на начальные для систем случайных событий однородного характера и применительно к последовательностям. Представлены краткие тезисы методик нахождения критической длины выборок, в пределах которых двоичные последовательности обладают значимой однородностью по заданным начальным или центральным вероятностным моментам. Приведен иллюстрационный пример сокращения затрат вычислительных ресурсов при реализации алгоритмов имитации вероятностных свойств внешней среды для моделируемого объекта. Отмечены области применения концепции однородности случайных последовательностей в теоретических постановках задач машинной реализации математических моделей и практических разработках средств адекватного сравнения статистических характеристик стохастических объектов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, вероятностный момент, начальный момент, центральный момент, значимая однородность, критерий однородности, двоичная последовательность.

Введение

Анализ задач машинного моделирования реальных объектов и процессов стохастического типа способен выявить ряд требований к случайным последовательностям, обеспечивающим проявление внешней среды [1, 2]. Кроме основных статистически оцениваемых вероятностных свойств [3], достоверно известными становятся объемы требуемых выборок, временные рамки использования средств

*Результаты исследования получены при поддержке гранта РФФИ и АН РТ № 18-47-160001.

Кузнецов Валерий Михайлович (д.т.н., доцент), профессор кафедры «Компьютерные системы».

Песошин Валерий Андреевич (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Компьютерные системы».

Гумиров Артем Ильдарович, старший преподаватель кафедры «Компьютерные системы».

Ширишова Дарья Вадимовна, старший преподаватель кафедры «Компьютерные системы».

имитации, а также данные о видах и порядках вероятностных моментов.

Методы статистических испытаний (методы Монте-Карло) в современных постановках требуют формирования многочисленных выборок случайных последовательностей разной длины [4, 5]. Уникальность необходимых вероятностных и корреляционных свойств вынуждает разработчиков имитационных экспериментов на ЭВМ подбирать адекватные этим алгоритмам программы или разрабатывать новые.

Простейшие варианты выполнения требований постановщиков задачи реализуются разработчиками машинного эксперимента выбором минимального набора последовательностей на основе *схемы независимых испытаний* Бернулли. Технически это достигается реализацией детерминированных алгоритмов получения псевдослучайных чисел [6, 7] или аппаратного формирования истинно случайных последовательностей [7–10], которые воспроизводят известные постулаты Голomba [10, 11], приближающие искусственный характер генерируемых последовательностей к идеальной модели случайного сигнала типа «белого шума» [7, 8].

Строгую математическую форму описания бернуллиевских свойств двоичных последовательностей дали А.Н. Колмогоров и В.А. Успенский [12]. Они определили в терминах теоретико-множественного представления и алгоритмической вычислимости три свойства случайности: типичности, хаотичности и стохастичности. Понимая под генеральной выборкой последовательность бесконечной длины, авторы алгоритмической теории случайности отнесли эти три свойства к *частной выборке* в виде цепочки конечной длины как фрагмента бесконечной последовательности.

Современные тенденции усложнения имитационного моделирования требуют задания многопараметрических атрибутов последовательностей на генеральных выборках, существенно отличающихся от схемы Бернулли вероятностными моментами высоких порядков. Такие программно-алгоритмические инструменты обеспечивают адекватность моделирования внешних возмущений в пределах оценок заданных моментов на конечных длинах частных выборок. Сами же вероятностные моменты, характеризуя исключительность генеральных выборок, делают практически невозможной параллельную реализацию уникальных алгоритмов формирования псевдослучайных отсчетов в условиях фон-неймановской архитектуры ЭВМ.

Разветвление и параллелизация алгоритмов генераторов псевдослучайных последовательностей за счет организации многоядерной, векторной, кластерной, мультипроцессорной обработки, безусловно, сокращает временные издержки имитационного моделирования, но это происходит ценой затрат аппаратных ресурсов весьма дорогих вычислителей. Возникает вопрос: нельзя ли использовать фактор конечности выборок имитирующих последовательностей для упрощения алгоритмов их формирования и за счет этого объединения нескольких разных последовательностей в одну?

Действительно, чем короче выборка, тем шире дисперсионный разброс статистических оценок вероятностных параметров разных случайных последовательностей, среди которых возникает возможность установления факта неразличимости двух и более выборок с длинами, не превышающими некоторой критической величины, с заданной уверенностью.

Пример экономии ресурсов

Рассмотрим пример воображаемой ревизии последовательностей в целях снижения ресурсной нагрузки на машинный эксперимент, связанный с реализацией имитационной модели. Обобщенная схема эксперимента представлена на рис. 1.

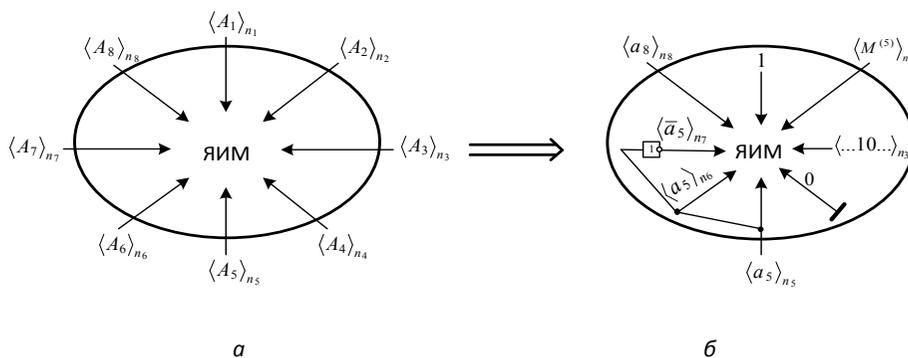


Рис. 1. Обобщенная структура имитационной модели статистического типа:
 а – исходная форма; б – результат ревизии входных последовательностей

Выделим в структуре общей постановки машинного эксперимента логико-алгоритмические блоки и связи, ядро имитационной модели (ЯИМ), находящееся под воздействием некоторой области внешних возмущений и внутренних вариаций свойств ядра как динамического объекта [2]. В случае статистического характера модели эти возмущения должны проявлять случайное поведение, адекватное моделируемым реальным процессам [1].

Пусть такая структура требует совокупности из 8 фрагментов двоичных последовательностей $\langle a_1 \rangle_{n_1}, \langle a_2 \rangle_{n_2}, \dots, \langle a_8 \rangle_{n_8}$, являющейся реализацией набора случайных последовательностей $\langle A_1 \rangle_{n_1}, \langle A_2 \rangle_{n_2}, \dots, \langle A_8 \rangle_{n_8}$ размерностью n_1, n_2, \dots, n_8 соответственно, с необходимыми оригинальными теоретико-вероятностными свойствами. Для их формирования надо создать алгоритмы и программы, реализация которых связана с необходимыми затратами машинной памяти и времени.

Предположим, что имеется инструмент попарного сравнения имитирующих последовательностей на предмет неразличимости их по вероятностным свойствам в пределах указанных длин выборок между собой. При проведении такого сравнения, с добавлением также в качестве альтернативных имеющихся в арсенале исследователя эффективных низкзатратных программных средств, включая примитивные источники типа констант и коротких циклов, было предположительно выяснено следующее:

- $\langle a_1 \rangle$ и $\langle a_4 \rangle$ на длинах n_1 и n_4 статистически неразличимы с константами 1 и 0 соответственно;
- $\langle a_2 \rangle$ на длине n_2 статистически не отличается от M-последовательности 5-го порядка $\langle M^{(5)} \rangle$;
- $\langle a_3 \rangle$ на длине n_3 статистически не отличается от элементарной последовательности типа $\dots 0101 \dots$;

- $\langle a_5 \rangle$ на длине n_6 и n_7 статистически неразличима с $\langle a_6 \rangle$ и $\langle \bar{a}_7 \rangle$ соответственно;
- $\langle a_8 \rangle$ на длине n_8 статистически оригинальна (отлична) от констант 1 и 0, последовательности типа $\dots 0101\dots$, $\langle M^{(5)} \rangle$, $\langle a_5 \rangle$ и $\langle \bar{a}_5 \rangle$.

Таким образом, для машинной реализации математической модели достаточно сформировать две оригинальные последовательности: $\langle a_5 \rangle$, совпадающую с $\langle a_6 \rangle$, $\langle \bar{a}_7 \rangle$, на длине $\max\{n_5, n_6, n_7\}$ и $\langle a_8 \rangle$ длиной n_8 , а также три низкокзатратных в ресурсном отношении типа $\langle a_3 \rangle = \dots 0101\dots$, на протяжении n_3 тактов, вырожденных в константы $\langle a_1 \rangle = 1$ и $\langle a_4 \rangle = 0$ в течение n_1 и n_4 тактов модельного времени (см. рис. 1 б).

Приведенный пример демонстрирует актуальность создания инструмента тестирования на статистическую неразличимость случайных последовательностей.

Статистически значимая однородность последовательностей

Ставится задача определения однородности двух последовательностей вероятностно-статистической природы $\langle a \rangle$ и $\langle b \rangle$ по выбранным квалифицирующим параметрам. Такими параметрами могут быть, например, математические ожидания базовой и альтернативной последовательностей (БП и АП). Для двоичных последовательностей они совпадают с вероятностями появления единицы соответственно, P_a и P_b . Покажем универсальность вероятности элементарных, а также сложных событий как квалифицирующего параметра при тестировании на однородность по моментам не только первого, но и более высокого конечного порядка.

Основная независимая переменная n – длина частной выборки. Имитационная модель воспринимает от БП вероятность P_a в форме статистических оценок на момент реализации n -го модельного такта, т. е. $P_a \rightarrow P_a^*(n)$. То же самое для АП: $P_b \rightarrow P_b^*(n)$. Предусмотрим ограничения вида τ_{\max} при исследовании на однородность автокорреляционных свойств, через моментные функции второго порядка, и предел n_{\max} для n . Из условий парадигмы, принятой в машинном моделировании конкретного класса стохастических объектов, задается типичный уровень *значимости критерия однородности* α как вероятность ошибки первого рода.

Используемый в непараметрических критериях подход [13–15] основывается на подсчетах эмпирической статистики, прямо пропорциональной средним значениям расхождений квалифицирующих параметров и обратно пропорциональной величине дисперсионного разброса оценок расхождений. Завершающей процедурой критерия является проверка гипотезы об однородности путем сравнения величины полученной статистики с критическим уровнем, учитывающим заданную значимость.

В данной задаче предусматриваются многократные испытания гипотез на основе статистики в форме отношения двух функций от n -ожидаемого различия оценок вероятностей $\Delta P^* = P_a^*(n) - P_b^*(n)$ и оценки стандартного отклонения этой разности, т. е.

$$t_{\text{эмп}}(n) = M_{\Delta P^*}^*(n) / \sqrt{D_{\Delta P^*}^*(n)}. \quad (1)$$

Эмпирический материал для этой статистики обеспечивается формированием достаточного множества выборок элементов разностной последовательности вида

$$\langle d \rangle_n = \langle a \rangle_n - \langle b \rangle_n \quad (2)$$

длиной n при ее возрастания от 1 до n_{\max} . Полученные числовые значения (1) сравниваются с некоторой критической величиной $t_{\text{кр}}(\alpha)$, дающей основание принять нуль-гипотезу H_0 об однородности тестируемых объектов или, отвергнув ее, выбрать конкурирующую гипотезу H_1 согласно условиям:

$$\begin{cases} |t_{\text{эмп}}| < t_{\text{кр}}, H_0, \max\lfloor n(|t_{\text{эмп}}| < t_{\text{кр}}) \rfloor = n_{\text{кр}}, \\ |t_{\text{эмп}}| \geq t_{\text{кр}}, H_1, n = \overline{1, n_{\max}}. \end{cases} \quad (3)$$

Содержательным результатом тестирования является: «Обе последовательности на длине выборки $n_{\text{кр}}$ (или не менее n_{\max}) статистически однородны (относятся к одной генеральной совокупности) со степенью значимости α ». При таком сравнительном исследовании не требуется определение самих вероятностных моментов и скрытых в них многосвязных условий расположения элементов тестируемых последовательностей на временной оси. Достигается лишь неразличимость, эквивалентность, взаимозаменяемость, подобность последовательностей в определенном смысле относительно заданных вероятностных моментов как по форме, так и по величине порядка.

Рассмотрим применимость классических вероятностных моментов конечных порядков, уделив особое внимание двоично структурированным формам последовательностей.

Начальные вероятностные моменты

Принято [14–16] начальный вероятностный момент порядка r дискретной случайной величины A представлять в виде

$$v_r(A) = \sum_{i=1}^u a_i^r p_i, \quad (4)$$

где u – количество уровней дискретности; p_i – вероятность принятия величиной A уровня a_i ; порядок r определен на множестве натуральных чисел.

Минимальное значение $u=2$ соответствует бинарному характеру величины A . Уменьшив на единицу оба предела суммирования в (4) и определив бинарность A алфавитом $a_i \in \{0, 1\}$ для $i = \overline{0, 1}$, представим следующее распределение вероятностей:

$$\frac{A}{p_i} \left| \begin{array}{c|c} a_0=0 & a_1=1 \\ \hline p_0 & p_1 \end{array} \right. , \text{ где } p_1 = \mathbf{P}\{A=1\}.$$

Если полагать $0^r = 0$ и $1^r = 1$, то справедливо следующее *утверждение*: начальный момент двоичной случайной величины A любого сколь угодно высокого конечного порядка r в виде натурального числа равен начальному моменту этой величины первого порядка, допускающий выражение в форме математического ожидания и вероятности появления единицы вида:

$$v_r(A) = v_1(A) = \mathbf{M}[A] \text{ и } \mathbf{M}[A] = \mathbf{P}\{A=1\} = p_1.$$

Связь центральных вероятностных моментов с начальными

Имитационная модель как объект использования случайных последовательностей может требовать однородности не по начальному, а по центральному вероятностному моменту r -го порядка общего вида $\mu_r(A) = \sum_{i=1}^u (a_i - v_1)^r p_i$ [13–16]. В этом случае двоичные формы элементарных переменных в событии центрального момента $\mu_r(A) = \sum_{i=0}^1 (a_i - v_1)^r p_i$ не позволяют свести процедуру тестирования на однородность к таким же простым и технологичным действиям с вероятностями, как это достигается при задании квалифицирующих параметров начальными моментами. Однако, используя выражение центрального момента через оператор математического ожидания $\mu_r(A) = \mathbf{M}[(A - v_1)^r]$, можно получить его разложение на ряд начальных моментов r -го и меньших порядков. Так, в литературе по теории вероятностей [14–17] приведены примеры разложения нескольких центральных моментов малого порядка на начальные:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 0, \\ \mu_2 &= v_2 - v_1^2, \\ \mu_3 &= v_3 - 3v_1 v_2 + 2v_1^3, \\ \mu_4 &= v_4 - 4v_1 v_3 + 6v_1^2 v_2 - 3v_1^4. \end{aligned} \quad (8)$$

Известно также общее выражение центрального момента через начальные:

$$\mu_r = \sum_{s=0}^r (-1)^s C_r^s v_{r-s} v_1^s. \quad (9)$$

При этом случайные события в абстрактной форме теоретико-вероятностного описания предполагают полную равноправность по отношению друг к другу, т. е. каждый элемент системы испытывает взаимозависимость от всех остальных, как это показано на рис. 2 а для $r = 4$.

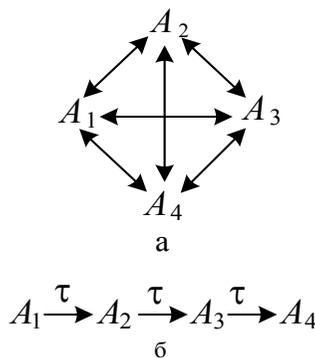


Рис. 2. Образование связей в сложных событиях:
 а – для равноправных элементарных переменных;
 б – в последовательностях

Применительно к процессам интересующие нас события A_j , где $j = \overline{1, r}$, разделяются однонаправленным дискретным временем τ , дисциплинирующим фор-

мирование системы случайных двоичных величин. Кроме этого, для полноты описания смешанными вероятностными моментами свойства последовательности необходимо ввести управляющие факторы временного расстояния в виде сдвигов элементов относительно друг друга на кратные τ тактов. Один из вариантов задания неанализируемых позиций двоичных комбинаций реализуется допустимостью условия $r_j = 0$. Однако в этом случае двоичный алфавит элементов последовательности для начальных моментов спровоцирует противоречие «ноль в нулевой степени». В целях его устранения изменим принадлежность r_j с множества натуральных чисел (в частности, с фиксированного значения 1) к множеству неотрицательных целых чисел 0 и 1, что позволит считать $0^0 = 1$ и $0^1 = 0$. На рис. 2 б приведен фрагмент расположения событий последовательного характера, участвующий в образовании вероятностного момента, в данном примере 4-го порядка.

Взаимные связи между элементарными событиями последовательности определяются разными временными расстояниями ($\tau, 2\tau, 3\tau$), что нарушает их равноправные отношения. Тем не менее общее представление последовательности, как и в случае образования наборов абстрактных событий, по формуле (9) разложения центрального момента r -го порядка, способствует однократному ($C_r^0 = 1$) вхождению начального момента $v_r = p_{\underbrace{11\dots 1}_r}$ того же r -го порядка в качестве слагаемого.

Так, например, при $r = 2$ это $v_2 = p_{11}$. Формальной инвариантностью разложения (9) также обладают два последних слагаемых при $s = r - 1, r$ вида

$$(-1)^{r-1} C_r^{r-1} v_1 v_1^{r-1} + (-1)^r C_r^r v_0 v_1^r = (-1)^{r-1} (r-1) v_1^r = \begin{cases} (r-1) p_1^r, & \text{когда } r - \text{нечетно,} \\ -(r-1) p_1^r, & \text{когда } r - \text{четно,} \end{cases}$$

дающих неизменное $(r - 1)$ -кратное вхождение r -ой степени вероятности появления 1 со знаком минус или плюс в зависимости от четности/нечетности порядка r . Например, при $r = 3$ это $2p_1^3$, а $r = 4$ дает $-3p_1^4$.

Анализ разложений центральных моментов на начальные для двоичных последовательностей

Описанные особенности первого и двух последних слагаемых в сумме (9) в виде вероятностей характерны как для двоичной последовательности, так и в классическом теоретико-вероятностном случае в виде начальных моментов равноправных абстрактных событий. То же самое касается части $(s + 1)$ -кратных вероятностей плотных наборов из $r - s$ двоичных символов последовательности и соответствующих начальных моментов абстрактных событий при $1 \leq s \leq r - 2$, т. е. $p_{11\dots 1}$, p_1 и v_r, v_1 .

Недостаточность описания центральных моментов последовательности в (8) и (9) проявляется при $r \geq 3$ и $1 \leq s \leq r - 2$. В этих случаях требуется включение не более $(C_r^s - s - 1)$ -кратных вероятностей комбинаций двоичных переменных, собранных в систему элементов с организацией пропусков тактового времени, нарушающих плотность набора анализируемых переменных.

Введенное переопределение элементарных порядков с $r_j = 1$ на $r_j \in \{0, 1\}$ допускает задание произведения $r_1 \cdot r_2 \cdots r_j \cdots r_r = 1$ для плотных r -ичных наборов

и $r_1 \cdot r_2 \cdots r_j \cdots r_r = 0$ для разреженных. Общий вид формул определения смешанных моментов как начальных, так и центральных применительно к двоичным значениям r_j и A_j представим в виде:

$$\nu_{r'}(A_1, A_2, \dots, A_r) = \sum_{\langle i_1 i_2 \dots i_r \rangle=0}^{2^{r'}-1} \prod_{j=1}^r a_{j i_j}^{r_j} p_{i_1 i_2 \dots i_r} = \mathbf{M}[A_1^{r_1} A_2^{r_2} \dots A_r^{r_r}]; \quad (10)$$

$$\mu_{r'}(A_1, A_2, \dots, A_r) = \sum_{\langle i_1 i_2 \dots i_r \rangle=0}^{2^{r'}-1} \prod_{j=1}^r (a_{j i_j} - v_1)^{r_j} p_{i_1 i_2 \dots i_r} = \mathbf{M}[A_1^{r_1} A_2^{r_2} \dots A_r^{r_r}], \quad (11)$$

где $\langle i_1 i_2 \dots i_r \rangle$ – r -разрядное двоичное целое число;

$r' = \sum_{j=1}^r r_j$ – частный (фактический) порядок момента как сумма единичных значений r_j ;

$A_1^{\circ}, A_2^{\circ}, \dots, A_r^{\circ}$ – центрированные величины A_1, A_2, \dots, A_r относительно общего математического ожидания $v_1 = p_1$.

Каждое нулевое значение r_j убирает из сложной комбинации элемент A_j (или A_j°), увеличивает на один такт временное расстояние между оставшимися элементами и уменьшает на единицу фактический порядок всего вероятностного момента в пределах $1 \leq r' \leq r$.

Например, при $r = 3$ второе слагаемое в разложении (9) для μ_3 обуславливает 3-кратное вхождение v_2 . Для абстрактной системы событий A_{j-1}, A_j, A_{j+1} это обеспечивается комбинациями $A_{j-1} A_j, A_j A_{j+1}$ и $A_{j-1} A_{j+1}$. В последовательности (при ее стационарности) первые две комбинации дают компонент $2p_{11}$, третья комбинация соответствует начальному моменту второго порядка, в общем случае отличному от моментов первых двух комбинаций того же второго порядка. Обозначим этот начальный момент $p_{1 \cdot 1}$ как вероятность совпадения по 1 двух переменных, разделенных двумя тактами реализации последовательности в дискретном времени за счет задания $r_j = 0$.

Нетрудно показать, что реальная случайная переменная A эквивалентна абстрактной системе A_1, A_2, \dots, A_k равноправных событий (см. рис. 2 а) в случае применимости к ним двоичного алфавита. Согласно замечанию о начальном моменте двоичной случайной величины допустимо считать $\nu_r = p_1$, где r – натуральное число. Тогда разложение (9) центральных моментов на начальные запишется в следующей вероятностной форме:

$$\mu_r = p_1 \left[1 + \sum_{s=1}^{r-1} (-1)^s C_r^s p_1^s \right] + p_1^r. \quad (12)$$

Конкретные виды связей центральных вероятностных моментов первых четырех порядков с начальными моментами для двоичной переменной и r -ичной системы двоичной последовательности представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что эти разложения существенно отличаются при $r \geq 3$ слагаемыми, записанными в суммах на позициях между p_1 или $p_{11 \dots 1}$ и $(r-1)p_1^r$.

Выражения центральных моментов через начальные для двоичной случайной величины и системы двоичных величин последовательности ($r=1, 4$)

μ_r	Для двоичной A	Для двоичной системы A_1, A_2, \dots, A_r
μ_1	0,	0,
μ_2	$p_1 - p_1^2$,	$p_{11} - p_1^2$,
μ_3	$p_1 - 3p_1^2 + 2p_1^3$,	$p_{111} - (2p_{11} + p_{1..1})p_1 + 2p_1^3$,
μ_4	$p_1 - 4p_1^2 + 6p_1^3 - 3p_1^4$	$p_{1111} - (2p_{111} + p_{1..11} + p_{11..1})p_1 + (3p_{11} + 2p_{1..1} + p_{1..1..1})p_1^2 - 3p_1^4$

Для численного определения центрального момента r -го порядка двоичной последовательности требуется найти все 2^{r-1} начальных моментов частных порядков от 1 до r . Например, при $r=4$ необходимо определить $2^{4-1} = 8$ вероятностей и в кратном количестве включить их в μ_4 как слагаемые и вычитаемые (см. верхние скобки) в следующем виде:

$$p_{1111}, \overbrace{p_{111}, p_{1..11}, p_{11..1}}^{v_3}, \overbrace{p_{11}, p_{1..1}, p_{1..1..1}}^{v_2} \text{ и } \overbrace{p_1}^{v_1},$$

что свидетельствует о неприменимости известного представления (8) и в общей форме (9) к рассматриваемым последовательным событиям.

Наборы из символов 1 и неопределенных символов (обозначенных точками), образующие необходимые сложные события последовательности для определения начальных моментов, входящих в центральный момент до 6-го порядка, приведены в табл. 2. Центральный момент μ_r наряду с $v_r = p_{\underbrace{11\dots 1}_r}$ включает в себя наборы из всех меньших порядков. Количество дополнительных наборов для данного порядка r относительно $r-1$ обозначено b_r , а общая сумма $\sum_{i=2}^r b_i$ приведена как c_r .

Таблица 2

Комбинации двоичных переменных сложных событий при определении связей начальных моментов двоичной последовательности с центральными для $r=2, 6$

r	Частный порядок $\tau' = \overline{1, r}$						b_r	c_r
	1	2	3	4	5	6		
2	1	11	–	–	–	–	2	2
3	–	1.1	111	–	–	–	2	4
4	–	1..1	1.11, 11.1	1111	–	–	4	8
5	–	1...1	1..11, 11..1, 1.1.1	1.111, 111.1, 11.11	11111	–	8	16
6	–	1....1	1...11, 1..1.1, 11...1, 1.1..1	1..111, 1.1.11, 1.11.1, 111..1, 11.1.1, 11..11	1.1111, 1.111, 1.1111, 111.1, 1111.1, 111111	16	32	

Нетрудно заметить в табл. 2, что при увеличении порядка центрального момента на единицу к двоичной комбинации соответствующего начального момента из плотного набора r единиц добавляются только $r-1$ неплотных наборов,

с кратно увеличенными задержками между внутренними символами. Это замечание делает очевидным заполнение табл. 2 для любого конечного r .

Формирование последовательностей сложных событий совпадения двоичных элементов для критерия однородности

Следует подчеркнуть, что для работы критерия однородности по вероятностным моментам не требуется вычислять числовые значения моментов, например в виде оценок соответствующих вероятностей. Достаточно воспроизвести сами последовательности событий по обеим тестируемым последовательностям и использовать их в качестве входных данных для работы критерия: образовать разность $\langle d \rangle_n$ по (2), оценить среднее, дисперсию Δp^* для статистики (1), получить цепочку реализации испытаний гипотез (3) и выбрать результат в виде $n_{кр}$ (или «не менее n_{max} »).

Последовательно формируемые случайные отсчеты $A_{j-1}, A_j, A_{j+1} \dots$, принимающие двоичные значения, объединяются конъюнкцией в группы, образующие сложные события (6) и/или (7), с учетом задержек между ними и инверсий. Варианты аппаратного формирования событий 4-го порядка представлены на рис. 3. Образование произведения элементарных переменных в прямой форме показано на рис. 3 а. Участие элементарных переменных в сочетании прямой и инверсной форм изображено схемой на рис. 3 б. Пример формирования неплотного набора элементарных переменных в прямой форме путем добавления задержки между первой и третьей переменными представлен на рис. 3 в для начального момента 3-го (частного) порядка.

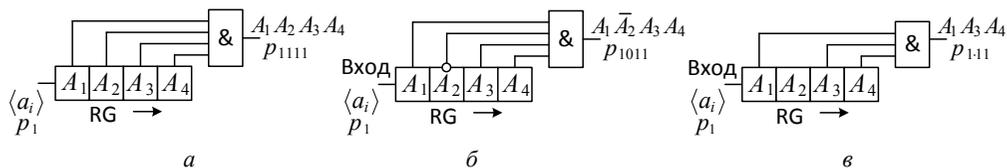


Рис. 3. Аппаратное формирование сложных событий двоичных последовательностей для определения начальных моментов, включаемых в состав заданного центрального момента

Краткая методика определения критической длины значимо однородных последовательностей по начальному вероятностному моменту. Заданным порядком r и конкретным видом начального вероятностного момента определяем необходимую функцию преобразования вида (6) обеих последовательностей на основе операций сдвигов, конъюнкции и, в необходимых случаях для вида (7), инверсии. Вероятность полученных комбинаций двоичных переменных представляет заданный начальный момент. Из последовательностей полученных событий от обеих тестируемых последовательностей образуем разностную последовательность, элементы которой используем как входные данные для статистического критерия. Проводим серию итераций по вычислению статистики, величины которой сравниваются с критическим уровнем, образуя испытания гипотез. Результатом этих итераций является цепочка (3) принятия нуль-гипотезы, классифицирующая свойство однородности тестируемых последовательностей с заданной значимостью по за-

данному начальному вероятностному моменту. Событие нарушения условия непротиворечивости нуль-гипотезы фиксируется как наступление критической длины частной выборки, превышение которой интерпретируется как прекращение однородности.

Краткое дополнение к методике определения критической длины значимо однородных последовательностей по заданному центральному вероятностному моменту. Используя оператор математического ожидания (11), получаем разложение заданного смешанного центрального момента r -го порядка на множество из 2^{r-1} начальных моментов, вид которых определен в табл. 2 как содержимое клеток с единичными наборами частных порядков. Определяем все необходимые функции преобразования видов начальных моментов с размерностью частных порядков от 1 до r , входящих в заданный центральный момент. Проводим необходимое количество серий итераций вычислений статистик для всех сформированных начальных моментов по вышеописанной методике. В результате проведенных в полном объеме серий тестовых итераций формируется множество значений критических длин, минимальная величина которых является искомой критической. За ее пределами тестируемые последовательности интерпретируются как неоднородные по заданному центральному вероятностному моменту.

Заключение

Получены обоснования применимости статистического метода определения значимой однородности к двоичным последовательностям по вероятностным моментам любого конечного порядка.

Выбор начального момента в качестве основного квалифицирующего ограничения однородности допускает однократное проведение цепочки испытаний гипотез. В случае выбора центрального момента работа критерия существенно усложняется необходимостью проверки однородности для всех порядков от 1 до r включительно. Полная аналитическая форма связи центрального момента r -го порядка с начальными для двоичной последовательности еще не установлена. Однако логика заполнения полученной в работе табл. 2 на алгоритмическом уровне вполне заменяет математическое выражение в задаче практической реализации критерия.

Анализируя содержание табл. 2, нетрудно сделать вывод, что центральный вероятностный момент порядка $r \geq 2$ включает в себя автокорреляционные зависимости в области определения аргумента $\tau = \overline{1, r-1}$ при условии однородности по вероятности p_1 . Это позволяет наряду с вероятностными моментами в качестве исходных квалифицирующих данных критерия применять значения автокорреляционной функции.

Процедура определения статистической однородности случайных последовательностей применима в задачах имитационного моделирования, вычислительных методах Монте-Карло, системах защиты информации. Обеспечение области существования значимой однородности в гарантированных пределах заданных вероятностных моментов повышает объективность сравнительного анализа свойств стохастических объектов и способствует повышению достоверности результатов машинной реализации математических моделей.

Приведенный материал может быть использован для синтеза аппаратных или программных анализаторов моментов и моментных функций как на ПЭВМ, так и с использованием многопроцессорных средств. Выявленные особенности анали-

тических связей начальных и центральных вероятностных моментов двоичных последовательностей (6), (7), (10)–(12) и табл. 2 достаточно полно задают арифметико-логические алгоритмы обработки моментных функций, ориентированные, например, на ресурсы программируемых интегральных схем в форме «системы-на-кристалле».

Рассматривается перспектива развития методов сравнительного исследования генераторов физически случайных последовательностей на предмет построения индикаторов поддержания статистически гарантированных штатных режимов работы в реальном времени. Разрабатывается методика оперативной поверки качества источников сложных двоичных сигналов на основе рассмотренной концепции однородности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Советов Б.Я., Яковлев С.А.* Моделирование систем: 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
2. *Forrester J.W.* Industrial Dynamics, Portland, OR: Productivity Press, 1961. 464 p.
3. *Knuth D.E.* The Art of Computer Programming: Seminumerical Algorithms. 3rd Edition. Addison-Wesley, 1997. 782 p.
4. *Bangsow S.* Manufacturing Simulation with Plant Simulation and Sim Talk Usage and Programming with Examples and Solutions. Springer, 2010. 300 p.
5. *Robert C.P., Casella G.* Monte Carlo Statistical Methods. 2nd Edition, Springer, 2004. 683 p.
6. *Schneier B.* Applied Cryptography. Protocols, Algorithms, and Source Code in C. New York: John Wiley & Sons, 1996.
7. *Johnston D.* Random Number Generators – Principles and Practices: A Guide for Engineers and Programmers. DEG Press, 2018. 439 p.
8. *Fischer V., Drutarovsky M.* True random number generator embedded in reconfigurable Hardware // Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2002, Redwood Shores, CA, USA, 2002, Revised Papers, ser. LNCS, vol. 2523. Springer, 2002. Pp. 415–430.
9. *Dichtl M., Golic J.* High-speed true number generation with logic gates only. Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2007, Vienna, Austria, 2007, Proceedings, ser. LNCS, vol. 4727. Springer, 2007. Pp. 45–61.
10. Recommendation for the entropy sources used for random bit generation // M.S. Turan, E. Barker, J. Kelsey, K.A. McKay, M.L. Baish, M. Boyle. NIST Special Publication. Computer Science Published. 2018. 84 p.
11. *Golomb S.W.* Shift Register Sequences, San Francisco: Holden-Day, 1967. 224 p.
12. *Колмогоров А.Н., Успенский В.А.* Алгоритмы и случайность // Теория вероятностей и ее приложения. М.: Наука, 1987. Т. XXXII, вып. 3. С. 425–455.
13. *Hossein Pishro-Nik.* Introduction Probability, Statistics and Random Processes. Kappa Research, LLC, 2014. 747 p.
14. *Dodge Y.* The Concise Encyclopedia of Statistics Authors: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 616 p.
15. *Кремер Н.Ш.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Юнити-Дана, 2002. 543 с.
16. *Петров А.В.* Исчисление смешанных моментов высших порядков при полиномиальной зависимости случайных величин // Вестник ИрГТУ, 2015. № 11. С. 16–22.
17. *Петров А.В.* К вопросу нормирования вероятностных характеристик // Вестник ИрГТУ, 2016. № 1. С. 56–64.

Статья поступила в редакцию 10 января 2020 года

ANALYSIS OF PROPERTIES OF PROBABILISTIC MOMENTS OF BINARY SEQUENCES FOR STOCHASTIC OBJECTS MODELING

V.M. Kuznetsov, V.A. Pesoshin, A.I. Gumirov, D.V. Shirshova

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev
10, K. Marx St., Kazan, Tatarstan, 420111, Russian Federation

Abstract. *The applicability of the statistical method for determining the significant homogeneity of binary sequences under probabilistic moments of any finite order for solving problems of mathematical modeling of stochastic objects is proved. Approaches to the construction of the homogeneity criterion in the framework of various ways of setting probabilistic moments are described. Significant differences in the decomposition of central probabilistic moments into raw ones for systems of random events of a homogeneous nature and concerning sequences are revealed. Brief theses of methods for finding the critical length of samples within which binary sequences have significant homogeneity over the specified raw or central probabilistic moments are presented. Areas of application of the concept of homogeneity of random sequences in theoretical statements of problems of machine implementation of mathematical models and practical development of means of adequate comparison of statistical characteristics of stochastic objects are determined.*

Keywords: *simulation, probabilistic moment, raw moment, central moment, significant homogeneity, homogeneity criterion, binary sequence.*

REFERENCES

1. *Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A.* System modeling: 3-e izd., pererab. i dop. M.: Vyssh. shk., 2001. 343 p.
2. *Forrester J.W.* Industrial Dynamics, Portland, OR: Productivity Press, 1961. 464 p.
3. *Knuth D.E.* The Art of Computer Programming: Seminumerical Algorithms. 3rd Edition. Addison-Wesley, 1997. 782 p.
4. *Bangsow S.* Manufacturing Simulation with Plant Simulation and Sim Talk Usage and Programming with Examples and Solutions. Springer, 2010. 300 p.
5. *Robert C.P., Casella G.* Monte Carlo Statistical Methods. 2nd Edition, Springer, 2004. 683 p.
6. *Muller M.E.* Some continuous Monte-Karlo methods for the Dirichlet problem. Annals Math. Statistics, 1956, v. 27, № 3. P. 569–589.
7. *Amann H.* Monte-Karlo methoden und lineare randwertprobleme. ZAMM, 1968, № 48. S. 109–116.
8. *Schneier B.* Applied Cryptography. Protocols, Algorithms, and Source Code in C. New York: John Wiley & Sons, 1996. 758 p.
9. *Neuman F.* Autocorrelation peaks in congruential pseudorandom number generators. IEEE Transactions on Computers, 1976, Vol. 25, № 5. P. 457–460.
10. *Johnston D.* Random Number Generators – Principles and Practices: A Guide for Engineers and Programmers. DEG Press, 2018. 439 p.
11. *Fischer V., Drutarovsky M.* True random number generator embedded in reconfigurable Hardware. Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2002, Redwood Shores, CA, USA, 2002, Revised Papers, ser. LNCS, vol. 2523. Springer, 2002. P. 415–430.
12. *Dichtl M., Golic J.* High-speed true number generation with logic gates only. Cryptographic Hardware and Embedded Systems – CHES 2007, Vienna, Austria, 2007, Proceedings, ser. LNCS, vol. 4727. Springer, 2007. P. 45–61.
13. Recommendation for the entropy sources used for random bit generation. M.S. Turan, E. Barker, J. Kelsey, K.A. McKay, M.L. Baish, M. Boyle. NIST Special Publication. Computer Science Published. 2018. 84 p.

Valery M. Kuznetsov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Valery A. Pesoshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Artyom I. Gumirov, Senior Lecture.
Darya V. Shirshova, Senior Lecture.

14. *Golomb S.W.* Shift Register Sequences, San Francisco: Holden Day, 1967. 224 p.
15. *Kolmogorov A.N., Uspenskij V.A.* Algorithms and randomness. Probability Theory and its Applications. M.: Nauka. 1987, Vol. XXXII, No. 3. P. 425–455.
16. *Hossein Pishro-Nik.* Introduction Probability, Statistics and Random Processes. Kappa Research, LLC, 2014. 747 p. <https://www.probabilitycourse.com>.
17. *Dodge Y.* The Concise Encyclopedia of Statistics Authors: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 616 p.
18. *Kremer N.Sh.* Theory of Probability and Mathematical Statistics. M.: Yuniti-Dana, 2002. 543 p.
19. *Petrov A.V.* Calculation of mixed moments of higher orders in the polynomial dependence of random variables. Vestnik IrGTU, 2015, № 11. P. 1622.
20. *Petrov A.V.* To the issue of standardization of probabilistic characteristics. Vestnik IrTU, 2016, № 1. P. 56–64.

УДК 681.5

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИЗОЛИРОВАНИЯ ЖИЛ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ*

В.Н. Митрошин, К.О. Свиридов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Предложен новый подход и методика управления наложением изоляции при изготовлении высокочастотных проводных кабелей связи высокой регулярности, обеспечивающая достижение требуемых характеристик выпускаемой продукции. Сформулированы основные задачи, решаемые при автоматизации технологического процесса наложения изоляции на экструзионных линиях. Разработаны цифровые системы стабилизации давления в формующем инструменте экструдера и стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования экструдера. Проведенный с использованием компьютерного моделирования анализ работы систем стабилизации режимных параметров технологического оборудования доказал их высокую эффективность.

Ключевые слова: высокочастотные кабели, система автоматизированного управления, экструзионные линии.

Основной физической средой передачи данных в современных кабельных системах являются проводные кабели – радиочастотные коаксиальные кабели (RG – Radio Guide) и LAN-кабели (Local Area Network Cable) на основе витых пар (Twisted Pair) [1].

Верхняя частота полосы пропускания радиочастотных коаксиальных кабелей достигает значений до 500 МГц [2, 3]. Такой кабель может обеспечить скорость передачи данных порядка 10 Гбит/с. Максимальная допустимая длина коаксиальных кабелей при этом не превышает 10–15 км.

LAN-кабели, используемые в структурированных кабельных системах передачи данных, относятся к категориям 5е, 6 и 7 [4].

Для LAN-кабелей указанных категорий характерны следующие характеристики:

- 1) категория 5е – передача данных со скоростью до 100 Мбит/с; f_B (верхняя частота передаваемого сигнала) – до 100 МГц;
- 2) категория 6 – передача данных со скоростью до 1 Гбит/с; f_B – до 200/250 МГц;
- 3) категория 6 – передача данных до 1 Гбит/с; f_B – до 600 МГц/1 ГГц.

При производстве проводных кабелей связи имеются жесткие требования к регулярности их первичных и вторичных параметров качества, определяющих

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-08-00506-а).

Митрошин Владимир Николаевич (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Свиридов Кирилл Олегович, студент.

основные эксплуатационные характеристики кабелей в требуемом частотном диапазоне передаваемых сигналов.

Изготовление проводных кабелей представляет собой многооперационный технологический процесс, определяющей операцией которого является изолирование токопроводящего проводника термопластичной полимерной изоляцией [5], выполняемое на шнековых прессах экструзионных линий [6, 7].

В загрузочный бункер шнекового экструдера засыпаются гранулы полиэтилена. Плавление полимера в экструзионной установке осуществляется при воздействии тепла от нагревательных элементов и вследствие трения гранул и движущегося расплава полиэтилена при его переработке. Непосредственное наложение расплавленной полимерной изоляции на токопроводящую жилу происходит в формирующем инструменте (кабельной головке) экструдера. При этом расплавленная масса полимера подается через кольцевой зазор между матрицей и протягиваемой через кабельную головку медной жилой, образуя с последней концентричный изоляционный слой. Полученная заготовка любого проводного кабеля – изолированная жила проходит охлаждение в нескольких ваннах с водой. При этом температура воды в них последовательно понижается, чтобы, с одной стороны, охладить изоляцию до температуры ниже +50 °С [8], при которой изоляция не деформируется при намотке жилы на приемный барабан, а с другой стороны, избежать резкого охлаждения изоляции – «закаливания», в результате чего в ней могут возникнуть внутренние механические напряжения, что приведет к последующему растрескиванию изоляции [9, 10].

При автоматизации процесса изолирования жил проводных кабелей в качестве объекта управления (ОУ) рассматривается вся экструзионная линия, включающая экструдер с приводом шнека, ванны охлаждения, привод тянущего устройства и т. д. [5]. Т. е. ОУ является сложным многосвязным объектом [4, 5] с распределенными параметрами [11, 12] и большим транспортным запаздыванием [13, 14].

При производстве проводных кабелей связи на операции наложения полимерной изоляции для обеспечения необходимого эксплуатационного показателя качества изготавливаемого кабеля, который можно будет проконтролировать только на готовом кабеле, стараются стабилизировать непосредственно измеряемые параметры изолированных жил.

Для этого при помощи соответствующих датчиков фиксируются основные качественные характеристики изолированных жил – диаметр и погонная емкость. Снятие данных происходит на готовой продукции (когда изоляция полностью сформировалась) – обычно в конце участка охлаждения [13]. Для улучшения динамических характеристик САУ используют максимально возможное приближение места установки датчиков первичных параметров изолированной жилы к экструдеру [14]. При этом системы управления наложением кабельной изоляцией, как правило, реализуются как системы регулирования выходных параметров по ошибке – то есть по отклонению от их номинальных значений [15, 16]. В [17] отмечается, что для пластицирующего шнекового экструдера главной причиной низкого качества производимой продукции являются вариации параметров, изменяющиеся в диапазоне от 0,5 до 10 циклов в минуту. При этом использование традиционного метода регулирования с помощью обратной связи по ошибке для объекта с большим транспортным запаздыванием, каким является экструзионная линия, не может справиться с подобными нарушениями [13].

При решении задачи синтеза САУ некоторыми режимными параметрами шнекового экструдера, такими как температурное поле расплава полимера в выходной зоне и формирующем инструменте экструдера, принципиально нельзя игнорировать четко выраженную неравномерность пространственной распределенности управляемой величины [11].

Для управления многосвязными объектами иногда применяют структуры САУ с развязывающими звеньями [15, 18].

Основным недостатком рассматриваемых систем является их непригодность для управления процессом наложения изоляции радиочастотных кабелей высокой регулярности вследствие, во-первых, отсутствия, как правило, обязательного учета всех базовых физических особенностей автоматизируемых объектов управления, а, во-вторых, игнорирования гарантированного обеспечения показателей качества изготавливаемого кабеля во всем диапазоне его рабочих частот.

Максимальная частота рабочего диапазона линии связи f_B определяет верхнюю частоту пространственных нерегулярностей g_{max} взаимодействующих с ним первичных параметров кабеля следующим образом [19]:

$$g_{max} = \frac{f_B}{v_e} = \frac{1}{L_{k\ min}}, \quad (1)$$

где $L_{k\ min}$ – минимальный пространственный период нерегулярностей первичных параметров кабеля, которые должны быть устранены системой регулирования;

v_e – скорость распространения электромагнитной волны по кабелю. Для коаксиального кабеля она равна согласно [20]

$$v_e = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_n}}; \quad (2)$$

здесь c – скорость света в вакууме; ε_n – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Например, для LAN-кабелей с верхней частотой полосы пропускания 600 МГц $L_{k\ min} = 0,165$ м. Это приводит к первому выводу: для обеспечения требуемой полосы пропускания высокочастотных линий связи САУ процессом изолирования должна устранять нерегулярности первичных параметров кабеля с пространственным периодом 0,165 м и более. При нахождении датчиков первичных параметров кабеля на расстоянии порядка 15 м от места наложения изоляции – головки экструдера – будет иметься звено с недопустимо большим транспортным запаздыванием. Длительность переходного процесса в такой САУ составит $(3 \div 4)\tau$ в лучшем случае [21], где τ – время транспортного запаздывания. Тогда:

$$L_{k\ min} = (3 \div 4)15 \text{ м} = 45 \div 60 \text{ м}. \quad (3)$$

Значит, система автоматического регулирования может лишь компенсировать отклонения первичных параметров, формируемых на операции изолирования с минимальным пространственным периодом порядка 45÷60 м. Такая «работа» САУ будет значительно ухудшать качество готовой продукции.

Из вышесказанного следует второй вывод – для управления процессами изолирования жил проводных высокочастотных кабелей принципиально неприменимы системы автоматического регулирования по отклонению непосредственно измеряемых параметров кабельной продукции.

В качестве решения озвученных проблем при разработке автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) изолирования жил кабелей связи предлагается на базе предварительного исследования автоматизируемого ТП выявить основные причины возникновения нестабильностей и рассмотреть пути значительной стабилизации рабочих параметров технологического оборудования.

В [22] в результате изучения экспериментальных данных, полученных в рабочем режиме эксплуатации линии NOKIA-80, на которой изготавливалась изолированная жила РЧ-кабеля РК 75-3,7-361, получена спектральная плотность мощности диаметра кабельной жилы по изоляции (рис. 1).

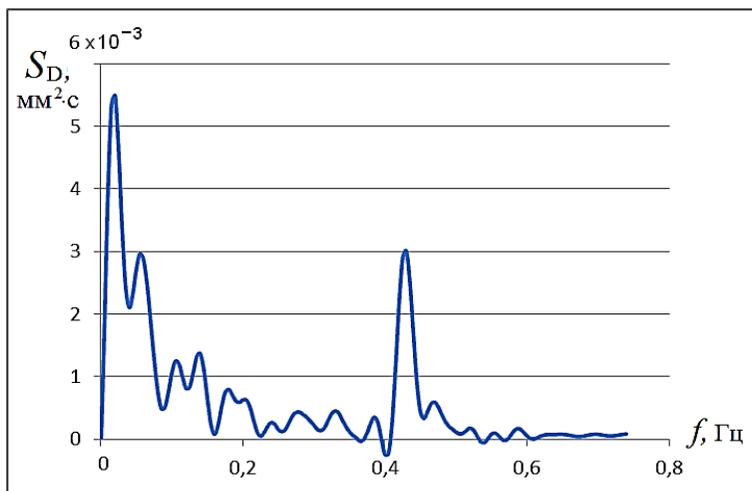


Рис. 1. Спектральная плотность мощности диаметра изолированной кабельной жилы

Анализ полученных результатов позволяет считать доказанным наличие в техпроцессе источника периодических возмущений с частотой $f = 0,43$ Гц. Этим источником является вращающийся шнек экструзионной линии изолирования. Скорость вращения шнека экструдера при снятии полученных данных равняется 25 об/мин, в частотном пересчете – 0,43 Гц [22].

Приведенные результаты эксперимента полностью соответствуют известным предположениям, описанным в технической литературе. Очевидно, что «высокочастотные» периодические нерегулярности диаметра изолированной кабельной жилы вызваны изменениями мгновенной объемной производительности шнекового экструдера.

Ранее высказывалась мысль [23], что «изменения мгновенной объемной производительности экструдера определяются гармоническими пульсациями градиента давления расплава полимера в кабельной головке, обусловленными вращающимся шнеком экструдера».

Отсюда следует, что для стабилизации мгновенной производительности шнекового экструдера основной задачей является максимально возможное уменьшение амплитуды пульсирующего давления в формирующем инструменте экструдера. Пульсации давления приводят к гармоническим изменениям мгновенной производительности экструзионной линии [23]. В итоге это вызывает появление периодической нерегулярности диаметра изолированной кабельной жилы.

В [23] предложена методика нахождения относительной амплитуды пульсирующего градиента давления χ_p . Для этого предлагается использовать значения давления расплава полимера на выходе зоны дозирования шнека Δp_{\max} и вблизи выхода формирующего инструмента Δp_{\min} . По измеряемым значениям Δp_{\max} и Δp_{\min} амплитуда колебаний рассчитывается в соответствии с (4):

$$\chi_p = \frac{\Delta p_{\max} - \Delta p_{\min}}{\Delta p_{\max} + \Delta p_{\min}}. \quad (4)$$

Как отмечается в [24], «при постоянной геометрии пресс-формы выдавливаемое количество массы полимера из головки экструдера (и, соответственно, ее объем) прямо пропорционально давлению массы в формирующем инструменте экструдера».

С другой стороны, отличительной особенностью процесса наложения изоляции является его высокая чувствительность к температуре. В работе [25] отмечено, что допуск на вариации температуры расплава полиэтилена при наложении изоляции на медную жилу коаксиального кабеля связи ВКПАП с верхней частотой полосы пропускания 10 МГц должен составлять не более ± 3 °С для обеспечения заявленной пропускной способности кабеля.

Это вторая задача, возникающая при автоматизации ТП управления изолированием медных жил при производстве высокочастотных РЧ кабелей.

Увеличение точности поддержания постоянной температуры расплава полиэтилена в экструзионной установке может быть получено только при учете основной физической особенности ОУ – пространственного распределения управляемой величины.

Подобный подход описан в [12], а реализованная система управления объектом с распределенными параметрами – температурным полем расплава полимера обеспечивает точность стабилизации температуры $\pm 0,5$ °С.

Авторами реализована двухконтурная САУ процессом наложения полимерной изоляции высокочастотных проводных кабелей. Данная система включает два независимых контура управления режимными параметрами технологической линии: цифровую систему гибридного управления давлением расплава полиэтилена в кабельной головке экструдера и систему автоматической стабилизации (САС) температуры расплава полиэтилена.

Анализ работоспособности и эффективности функционирования этих систем был проведен с использованием пакета Matlab/Simulink.

На рис. 2 представлена дискретная модель системы гибридного управления давлением расплава полимера в кабельной головке шнекового экструдера в Matlab/Simulink/Stateflow. Pulse Generator используется для регулирования шага дискретизации в системе. В качестве датчика давления выбран первичный преобразователь давления расплава BAUMER, предназначенный для измерения давления расплавов полимеров, точность которого – 0,1 %. На рис. 3, 4 приведен дискретный вид ПИД-регулятора и передаточной функции ОУ.

На рис. 5 приведен результат работы цифровой системы гибридного управления давлением расплава полимера в кабельной головке (1 – возмущающее воздействие; 2 – стабилизированное давление на выходе системы управления).

На рис. 6 в увеличенном масштабе показаны пульсации давления расплава полимера после его стабилизации.

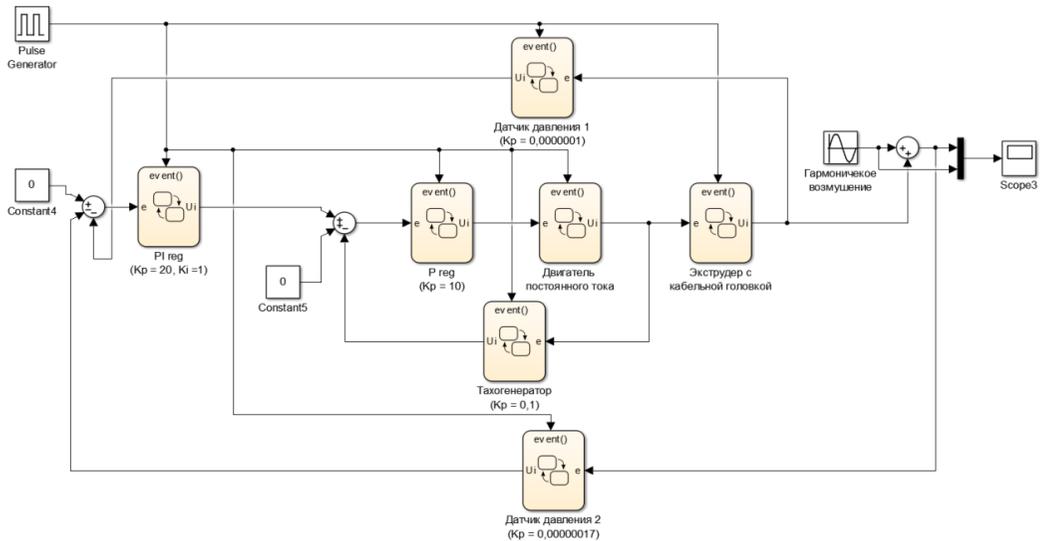


Рис. 2. Модель системы гибридного управления давлением расплава полимера в кабельной головке шнекового экструдера в Matlab/Simulink

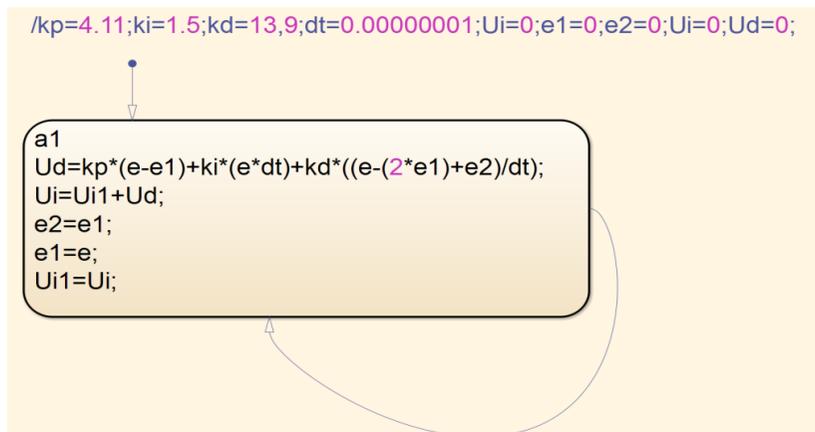


Рис. 3. Дискретная модель ПИД-регулятора в Matlab/Simulink/Stateflow

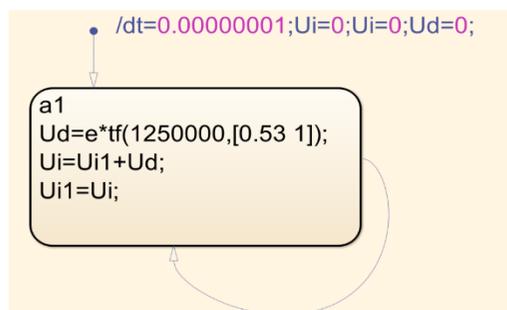


Рис. 4. Дискретная модель передаточной функции ОУ в Matlab/Simulink/Stateflow

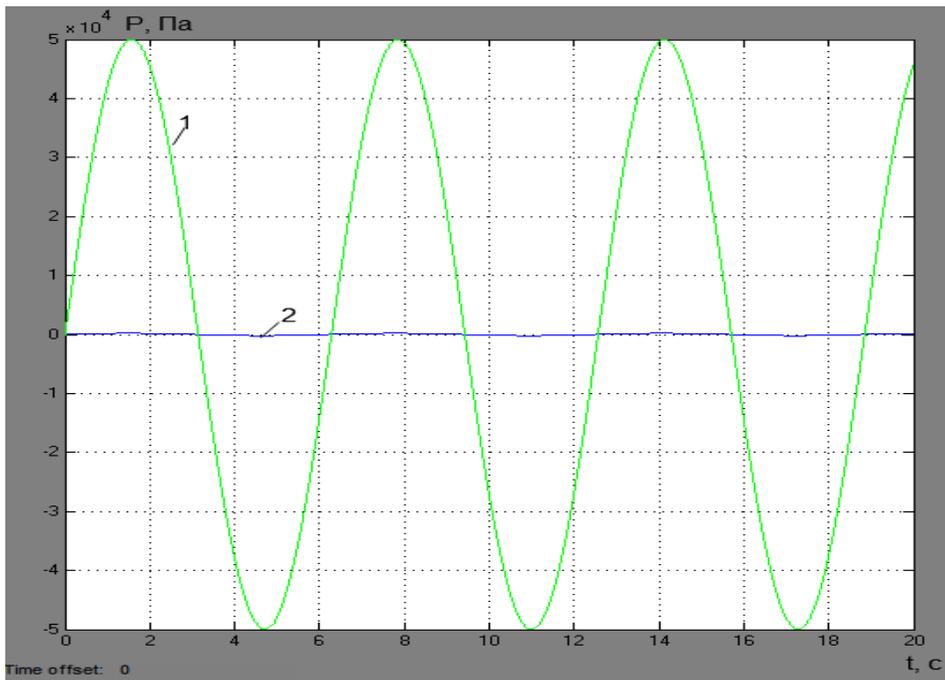


Рис. 5. Эффективность работы системы гибридного управления давлением расплава полимера в кабельной головке одночервячного экструдера

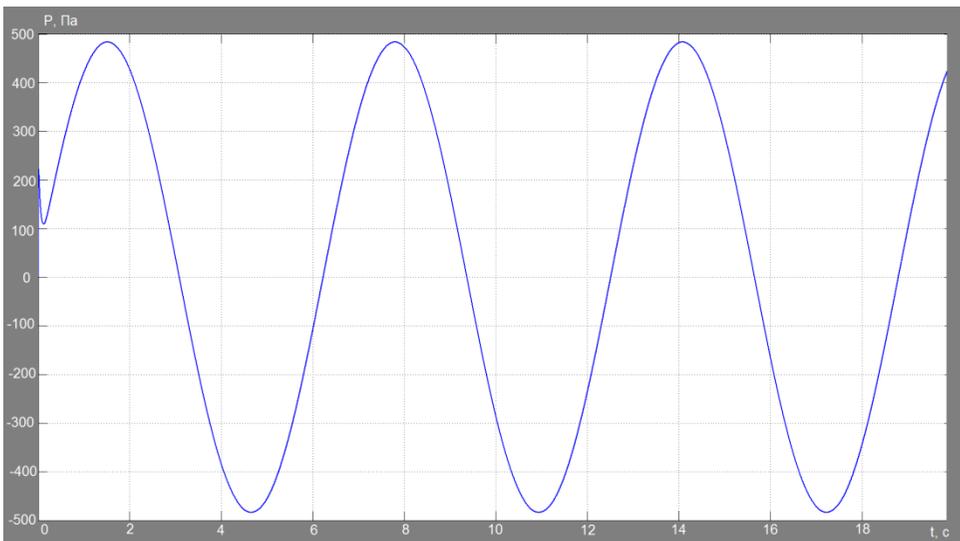


Рис. 6. Пульсации давления расплава полимера после его стабилизации

Начальная амплитуда пульсаций давления расплава в формирующем инструменте экструдера до его стабилизации составляла $5 \cdot 10^4$ Па (или 0,86 % от его заданного значения). После стабилизации давления его амплитуда уменьшилась до $4,85 \cdot 10^2$ Па. При анализе качества отработки САУ возмущающего воздействия видно, что амплитуда пульсаций давления расплава

полимера в формующем инструменте экструдера снизилась в 103 раза (или 0,0083 % от заданного значения давления).

При синтезе системы стабилизации температуры расплава полимера использовалось описание ОУ, приведенное в [11]. При сосредоточенном управлении с помощью температуры $\tilde{T}_ц(p)$ цилиндра экструдера, равномерно распределенной по длине зоны дозирования, рассматриваемый объект управления является конечно представимым [26], так как в структурном отношении его можно представить соединением конечного числа типовых звеньев: аperiodического, статического и звена чистого запаздывания. Эквивалентное структурное представление ОУ, выходом которого является температура расплава полимера $\tilde{T}(z, p)$ в зоне дозирования экструдера, а входом – $\tilde{T}_ц(p)$, дано на рис. 7 [11].

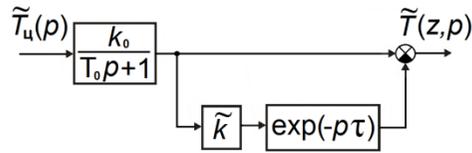


Рис. 7. Эквивалентная структура ОУ – зоны дозирования шнекового экструдера с выходом по температуре расплава полимера

Здесь $\tau = z/\bar{V}_z$ – время запаздывания при прохождении полимера по каналу шнека от входа в зону дозирования до места контроля температуры расплава; z – координата вдоль канала шнека; \bar{V}_z – средняя скорость движения расплава полимера в зоне дозирования шнека;

$$\tilde{k} = \exp\left(-\frac{K_1 z}{\bar{V}_z}\right); K_1 = \frac{a+bK^*h}{pCh}; k_0 = \frac{1}{b^*K_1} = \frac{a}{a+bK^*h}; T_0 = \frac{1}{K_1}; \quad (5)$$

$$b^* = \frac{pCh}{a}; K = \mu_0 \left(\frac{V_0}{h}\right)^{\frac{n+1}{n}} \bar{B}^{\frac{n+1}{n}}; K^* = K e^{bT_0}; \quad (6)$$

где a – коэффициент теплоотдачи между цилиндром экструдера и полимером;
 b – температурный коэффициент вязкости полиэтилена высокого давления низкой плотности (ПЭВД) марки 153-01К;

h – глубина канала шнека;

C – удельная теплоемкость полиэтилена;

ρ – плотность сплошного полиэтилена;

T_0 – температура плавления полимера;

n – индекс течения полиэтилена;

μ_0 – ньютоновская вязкость полиэтилена;

φ – угол захода шнека экструдера;

y – координата канала шнека по его глубине;

a^* – коэффициент, соответствующий максимальной производительности экструдера [7];

\bar{B} – среднее значение B_y (7) во всем диапазоне глубины шнека $0 < y < h$.

$$B_y = \left(\frac{6y}{h-1}\right)^2 \sin^2 \varphi + \left(\frac{6a^*y}{h-3a^*+1}\right)^2 \cos^2 \varphi. \quad (7)$$

Для модели (рис. 7) в соответствии с ее имеющимся аналитическим описанием путем расчета получены следующие параметры ОУ для зоны дозирования

экструдера NOKIA-80: $k_0 = 1$; $T_o = 5,6$ с; $\tau = 41,7$ с; $\bar{k} = 0,024$.

На рис. 8 приведена модель в Matlab/Simulink системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера NOKIA-80. Рассчитанные настройки PID-регулятора следующие: Integral 1.5; Proportional 4.11; Derivative 13.9.

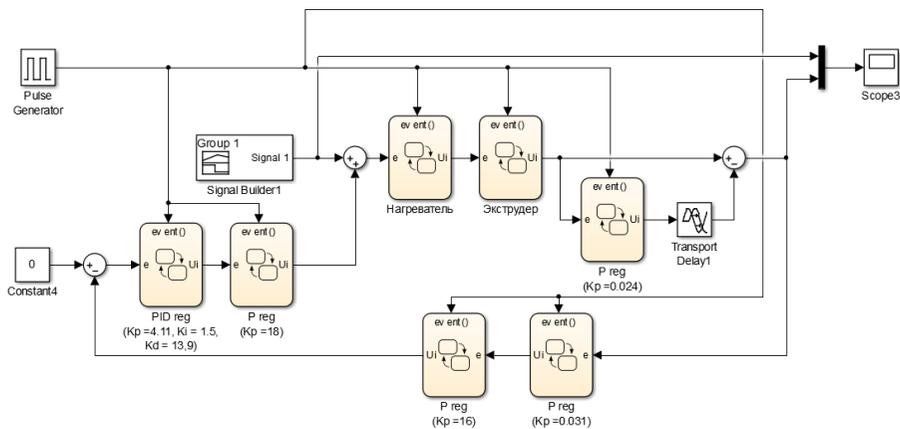


Рис. 8. Модель в Matlab/Simulink системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера

При анализе системы стабилизации температуры расплава исследовалась отработка САУ возмущающего воздействия (рис. 9).

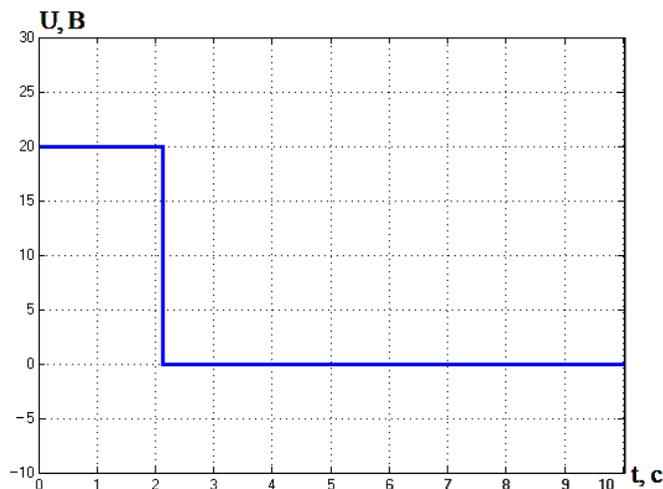


Рис. 9. Возмущающее воздействие системы стабилизации температуры расплава полимера (время моделирования 10 с)

На рис. 10 приведена реакция системы стабилизации температуры расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера на данное возмущающее воздействие.

По результатам проведенного исследования на основании анализа отработки системой стабилизации температуры расплава полимера возмущающего

воздействия, показанного на рис. 9, можно сделать вывод об эффективности разработанной системы.

Синтезированная цифровая система автоматического управления температурой расплава полимера в зоне дозирования шнекового экструдера обеспечивает стабилизацию температуры с точностью выше $\pm 0,2$ °С, что является лучшим из известных на сегодня решений и соответствует предельному классу точности наилучших на сегодняшний день датчиков температуры.

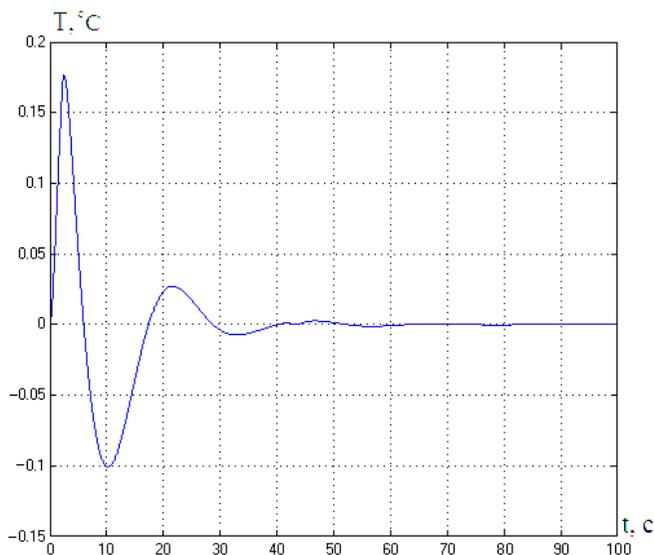


Рис. 10. Отработка возмущающего воздействия системой стабилизации температуры расплава полимера

Предложенные в данной работе подходы и полученные результаты позволили обеспечить решение нескольких задач, существенно повышающих качество изготавливаемой на экструзионной линии продукции. Во-первых, реализация систем стабилизации важнейших режимных параметров работы технологического оборудования, таких как мгновенная производительность шнекового экструдера и температура расплава полимера в зоне дозирования экструдера, позволили осуществлять управление сложным многосвязным объектом по двум независимым контурам в условиях малых вариаций режимных параметров работы технологического оборудования. Во-вторых, стабилизация режимных параметров работы технологического оборудования с жесткими допусками позволила производить проводные кабели с гарантированными эксплуатационными показателями качества в требуемом частотном диапазоне.

Так, при наложении пористой полиэтиленовой изоляции на медный проводник РК-кабеля РК75-3,7-361 на экструзионной линии NOKIA-80 начальная амплитуда гармонических пульсаций давления расплава полимера до его стабилизации составляла в формующем инструменте экструдера $5 \cdot 10^4$ Па. При этом гармонические нерегулярности диаметра изолированной жилы были 20 мкм. После стабилизации давления его амплитуда уменьшилась до $4,85 \cdot 10^2$ Па, а нерегулярности диаметра изолированной жилы не превышали 6 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2002. 640 с.

2. *Дорезюк Н.И., Попов М.Ф.* Радиочастотные кабели высокой регулярности. М.: Связь, 1979. 104 с.
3. *Гальперович Д.Я., Павлов А.А., Хренков Н.Н.* Радиочастотные кабели. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
4. *Митрошин В.Н., Колпациков С.А.* Автоматизация процесса наложения полимерной изоляции при изготовлении проводных кабелей связи // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Технические науки. 2018. № 3(59). С. 28–40.
5. *Митрошин В.Н.* Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. М.: Машиностроение-1, 2006. 140 с.
6. *Рауендаль К.* Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. СПб.: Профессия, 2008. 768 с.
7. *Торнер Р.В.* Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1977. 464 с.
8. *Зиннатуллин Р.Р., Труфанова Н.М., Шилинг А.А.* Исследование процессов теплопереноса и фазовых превращений при охлаждении провода с полимерной изоляцией // V Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. Т. 2. 24–28 мая 2004 г. Минск, 2004. С. 130–131.
9. *Карякин Н.Г., Фурсов П.В.* Расчет возможности образований воздушных включений в пластмассовой изоляции кабеля при охлаждении // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1977, № 5. С. 8–11.
10. *Костенко Э.М., Перфильев А.Н.* Исследование усадки кабельной полиэтиленовой изоляции // Конструирование и исследование высокочастотных кабелей. Л.: Связь, 1974. С. 180–187.
11. *Митрошин В.Н.* Автоматическое управление объектами с распределенными параметрами в технологических процессах изолирования кабелей связи. М.: Машиностроение-1, 2007. 184 с.
12. *Нечаев А.С.* Автоматическое управление температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера технологической линии изготовления кабелей связи: Дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2013. 131 с.
13. *Merki H.A.* Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation. Wire Industry, 1983, vol. 50, № 389, p. 39–42.
14. *Митрошин В.Н.* Обоснование выбора места установки датчиков на экструзионной линии по производству кабельной жилы с пенопластовой изоляцией // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Сер. Технические науки. Пенза: ПГУ, 2005, № 5 (20). С. 69–75.
15. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 1, s. 28–31.
16. *Laurich K., Muller G., Wallau H.* Automatisierungssystem für kabelummantelungsanlagen. Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 7, s. 370–374.
17. *Chan D., Lee L.J.* Dynamic modeling of a single screw plasticating extruder. ANTEC'84, 1984, p. 77–80.
18. *Чостковский Б.К.* Методы и системы оптимального управления процессами производства кабелей связи. М.: Машиностроение, 2009. 190 с.
19. *Дорезюк Н.И.* Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1974. № 6. С. 18–22.
20. *Гроднев И.И., Фролов П.А.* Коаксиальные кабели связи. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
21. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
22. *Митрошин В.Н., Кулешиова Д.И.* Разработка системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции // Вестник Самарского государственного университета. Сер. Технические науки. 2015. № 1(45). С. 71–77.
23. *Marinov S., Steller S.* Erfassung der Sohmelzeströmung in Extrusionsdüzen bei pulsierendem Druckgradienten. Plaste und Kautschuk. 1985. Bd. 32. № 9. S. 346–349.
24. *Reiner T., Bohmann J.* Prozessorgeregeltes ummanteln elektrischer Leiter // Drahtwelt. 1986. Jg. 72. № 5. S. 138–141.
25. *Степанов Л.Е.* Коаксиальный кабель зонной связи до 10 МГц с изоляцией из вспененного полиэтилена: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. 226 с.
26. *Маковский В.А.* Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами. М.: Металлургия, 1971. 384 с.

Статья поступила 10 декабря 2019 г.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL PROCESS OF EXTRUSION LINE FOR COMMUNICATION CABLES PRODUCTION

V.N. Mitroshin, K.O. Sviridov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The new approach and method of controlling the imposition of insulation in the manufacture of high-frequency wired communication cables of high regularity, ensuring the achievement of the required characteristics of the products was proposed. The main tasks are formulated when automating the technological process of imposing insulation with extrusion lines. Discrete systems have been developed to stabilize the pressure in the cable head of the extruder and stabilization of the polymer melt temperature in the dosing zone of the extruder has been developed. The analysis of the work of the systems for stabilization of the operating parameters of the process equipment carried out using computer simulation proved their high efficiency.*

Keywords: *high frequency cables, automated control systems, extrusion lines.*

REFERENCES

1. *Semenov A.B., Strizhakov S.K., Suncheley I.R.* Structured Cabling Systems. Moscow: IT Co., DMK Press, 2002. 640 p. (In Russian).
2. *Dorezjuk N.I., Popov M.F.* High Frequency Radio Frequency Cables. Moscow: Svyaz', 1979. 104 p. (In Russian).
3. *Galperovich D.Ya., Pavlov A.A., Hrenkov N.N.* Radio frequency cables. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 256 p. (In Russian).
4. *Mitroshin V.N., Kolpashchikov S.A.* Automation of the isolation process by polymer in the manufacture of wired communication cables. Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences". № 3 (59). 2011. pp. 28–40. (In Russian).
5. *Mitroshin V.N.* Automation of technological processes for the production of communication cables. Moscow: Mashinostroenie-1, 2006. 140 p. (In Russian).
6. *Rauwendaal C.* Polymer Extrusion. SPb: Profession, 2008. 768 p. (In Russian).
7. *Torner R.V.* Theoretical bases of polymer processing. Moscow: Chemistry, 1977. 464 p. (In Russian).
8. *Zinnatullin R.R., Trufanova N.M., Schilling A.A.* Investigation of heat transfer processes and phase transformations during cooling of wires with polymer insulation. V Minsk Int. forum on heat and mass transfer. Abstracts of reports and messages. T. 2. May 24–28, 2004 – Minsk, 2004. – pp. 130–131 (In Russian).
9. *Karyakin N.G., Fursov P.V.* Calculation of the possibility of formation of air inclusions in the plastic insulation of the cable during cooling. Electrical industry. Series "Cable Technology", 1977, No. 5, pp. 8–11 (In Russian).
10. *Kostenko E.M., Perfilyev A.N.* The study of shrinkage of cable polyethylene insulation. Design and study of high-frequency cables. L.: Svyaz', 1974. pp. 180–187 (In Russian).
11. *Mitroshin V.N.* Automatic control of objects with distributed parameters in technological processes of isolation of communication cables. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007. 184 p. (In Russian).
12. *Nechaev A.S.* Automatic control of the temperature of the polymer melt in the dosing zone of a single-night extruder of the technological line for the manufacture of communication cables: Dis. ... Cand. tech. Sciences: Novocheboksarsk, 2013. 131 p. (In Russian).
13. *Merki H.A.* Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation. Wire Industry, 1983, vol. 50, № 389, pp. 39–42.

*Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Kirill O. Sviridov, Student.*

14. *Mitroshin V.N.* Justification of the choice of installation location of sensors on an extrusion line for the production of cable conductors with foam insulation // Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Ser. Technical science. – Penza: PSU, 2005, No. 5 (20). pp. 69–75 (In Russian).
15. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 1, s. 28–31.
16. *Laurich K., Muller G., Wallau H.* Automatisierungssystem für kabelummantelungsanlagen. Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 7, s. 370–374.
17. *Chan D., Lee L.J.* Dynamic modeling of a single screw plasticating extruder. ANTEC'84, 1984, p. 77–80.
18. *Chostkovsky B.K.* Methods and systems for optimal control of communication cable production processes. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 190 p. (In Russian).
19. *Dorezjuk N.I.* Harmonic analysis of periodic in homogeneities of the wave resistance of coaxial cables. Electrotechnical industry. A series of "Cable Technology". Vol. 6. 1974. P. 18–22 (In Russian).
20. *Grodnev I.I., Frolov P.A.* Coaxial communication cables. Moscow: Radio I Svyaz', 1983. 208 p. (In Russian).
21. *Guretsky H.* Analysis and synthesis of control systems with delay. M.: Mashinostroenie, 1974. 328 p.
22. *Mitroshin V.N., Kuleshova D.I.* Development of a control system for isolating communication cables ensuring the achievement of the required operational quality of products // Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences". № 1 (45). 2015. P. 71–77 (In Russian).
23. *Marinov S., Steller S.* Erfassung der Sohmelzströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckdradienten // Plaste und Kautschuk. 1985. Bd. 32. № 9. S. 346–349.
24. *Reiner T., Bohmann J.* Prozessorgeregeltes ummanteln elektrischer Leiter // Drahtwelt. 1986. Jg. 72. № 5. S. 138–141.
25. *Stepanov L.E.* Coaxial cable zonal communications up to 10 MHz with foam insulation: Dis. ... Cand. tech. Sciences: Moscow, 1985. 226 p. (In Russian).
26. *Makovsky V.A.* Dynamics of metallurgical objects with distributed parameters. M.: Metallurgy, 1971. 384 p. (In Russian).

УДК 005.94

О МЕТОДАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЗНАНИЙ АКТОРОВ ПРИ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ РАЗРЕШЕНИЕМ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ

Т.В. Моисеева¹, Ю.С. Муханов²

*Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук»
Россия, 443010, г. Самара, ул. Садовая, 61*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Россия, 443090, г. Самара, ул. Московское шоссе, 77*

Аннотация. Рассмотрена специфика интерсубъективного управления разрешением проблемных ситуаций, в которых оказываются акторы, работающие в социотехнических объектах. Показано отличие традиционного управления социотехническими объектами от интерсубъективного. Важность тематики связана с тем, что результат разрешения проблемных ситуаций акторами является основой для дальнейшей разработки инновационных продуктов социотехнических объектов. Показано отличие проблемных ситуаций, в которых оказываются люди – субъекты этих производственных ситуаций, от тех ситуаций, в которых люди являются объектами управления. Отмечена важность формирования методологии управления принятием решений в производственных проблемных ситуациях при субъект-субъектных отношениях. Предложено дополнить методологию теории интерсубъективного управления методами визуализации знаний акторов. Поэтому целью данного исследования является изучение существующих методов визуализации знаний как средства усиления ментальных процессов с последующим выбором методов, поддерживающих и облегчающих процесс принятия решения акторами. Рассмотрены два механизма мышления субъектов, лежащие в основе представления знаний акторов. Показано, что образное мышление, основанное на пространственно-структурных отношениях, лежит в основе создания визуальных образов проблемной ситуации. Рассмотрены основные методы визуализации, применяемые в управлении. В качестве основы систематизации методов визуализации выбрана «периодическая» таблица, предложенная Ральфом Лэнглером и Мартином Ипплером, в которой все методы разделены на шесть групп (визуализация данных, визуализация связей, концептуальная визуализация, визуализация стратегий, визуальная метафора и составная визуализация). Проведен авторский анализ и подробное описание данных методов, подкрепленное примерами применения различных средств визуализации. Проведен выбор методов когнитивной визуализации для представления знаний акторов. Для каждого этапа процесса разрешения проблемных ситуаций предложено использование разных групп методов из «периодической» таблицы.

Ключевые слова: интерсубъективное управление, проблемная ситуация, актор, управление знаниями, визуализация знаний, методы визуализации.

Моисеева Татьяна Владимировна (к.э.н.), доцент.
Муханов Юрий Сергеевич, магистрант.

Введение

В основе традиционной теории управления, широко применяемой при управлении современными социотехническими объектами, лежит признание субъект-объектных отношений, подразумевающих, что субъектность является свойством носителя управленческих функций, а объектность – свойством того, кем управляют для достижения целей субъекта. Т. е. объектом управления считаются люди (сознательные и активные), не наделенные функциями принятия решений, а выполняющие «механические» действия.

Динамичное развитие общества предъявляет новые требования к управлению социотехническими объектами, которые становятся все более сложными, требующими новых методов и подходов к решению управленческих задач. В последнее время в управлении стали рассматриваться субъект-субъектные отношения, ориентированные на более полное использование потенциала людей. В какой-то степени это связано именно с таким его пониманием в социальной психологии, где в качестве субъектов выступают не только руководители предприятий, но и исполнители.

Один из наиболее перспективных подходов, появившихся в последнее десятилетие, основан на субъектно-ориентированной науке о процессах управления в обществе – эвергетике, предполагающей участие людей из повседневной жизни в процессах принятия решений [1]. Методологической базой эвергетики является теория интересубъективного управления (ТИСУ) разрешением проблемных ситуаций, предполагающая включение в процессы управления не только на социотехнических объектах, но и в обществе неоднородных акторов из повседневного жизненного мира [2, 3]. Как отмечает В.А. Виттих в [4], эвергетика может дополнить классическую науку об управлении и сыграть важную роль, «создав теоретический фундамент для совершенствования процессов управления в обществе путем использования интеллектуальных и волевых ресурсов людей из повседневности».

Стремясь разрешить проблемную ситуацию, акторы находят такие решения, которые становятся основой для дальнейшей разработки инновационных продуктов социотехнических объектов, влияя таким образом на разработку инновационной стратегии предприятий [5].

Методология управления принятием решений в производственных проблемных ситуациях, в которых оказываются и руководители разных уровней, и их подчиненные, еще не сформировалась окончательно. Очевидно, что сегодня уже невозможно обойтись без применения современных информационных средств, среди которых особое место занимают средства визуализации данных, информации и знаний. У визуализации есть неоспоримые преимущества: она может служить источником информации для пользователя, не требуя теоретических знаний и специальных навыков работы, может выступить тем языком, который объединит профессионалов из различных проблемных областей, может превратить исходный набор данных в изображение, благодаря которому у акторов могут появиться абсолютно новые, неожиданные решения.

1. Теория интересубъективного управления

Ключевое отличие нового подхода к управлению (ТИСУ) от традиционных заключается в том, что управленческие функции осуществляют «социальные теоретики», по определению Э. Гидденса [6], – люди из повседневности, а не управленцы. Объектом исследования является проблемная ситуация, в которую погру-

жены неоднородные акторы, осознающие ее, а не познающие как внешние наблюдатели. ТИСУ впервые обратилась к такой сфере управления, как управление разрешением проблемных ситуаций (складывающихся в обществе, в ходе производственных процессов или в быту) самими участниками этих ситуаций, которые принимают решение, какой выход подойдет именно им. Это значит, что выработать универсальное решение проблемы, в которую вовлечены разные группы акторов, невозможно. Время, место, особенности участников данной проблемной ситуации и пр. будут диктовать свои уникальные условия, а основной движущей силой, управляющей поведением акторов и заставляющей их действовать, становится внутренняя мотивация, а не приказы руководства.

В процессе поиска и формулирования смысла акторы обращаются к тем знаниям, которые необходимы им в данной проблемной ситуации, опираясь на ее предпонимание. Акторы актуализируют свои персональные знания, накопленные до появления проблемной ситуации, которые имеют неявный характер. Для того чтобы в ходе коммуникаций поделиться этими знаниями с другими акторами, их нужно трансформировать в явную форму, используя вербальные и прочие средства общения (рис. 1).

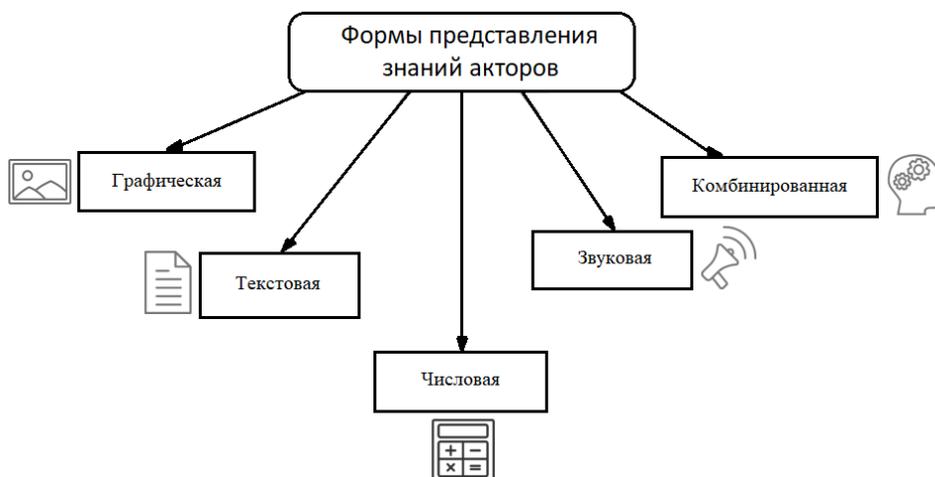


Рис. 1. Формы представления знаний акторов

Опираясь на собственные знания и опыт, руководствуясь личными предпочтениями, гетерогенные акторы формируют персональные онтологии. Видение акторов подвергается социальному влиянию (в соответствии с уровнем доверия к другим субъектам), под «давлением» которого акторы изменяют свое мнение. В основе согласования мнений лежат итерации, последовательно сближающие мнения акторов. Сходимость персональных онтологий к общей происходит в рамках такой модели динамики мнений, как консенсус, когда для получения единой оценки для всей группы субъект вынужден вести себя конформно, «усредняя» свое мнение с мнениями тех субъектов, с которыми он взаимодействует, понимая, что разногласия не позволят принять общее решение и оно не будет принято вообще. Таким образом, субъекты-акторы участвуют в коллегиальном разрешении проблемных ситуаций в социальных, экономических, социотехнических системах, которые, по сути, являются интер-субъективными.

В ходе проектирования общей онтологической модели акторы договариваются о способах урегулирования проблемной ситуации, и чем лучше они смогут передать свою точку зрения, тем быстрее и эффективнее окажется процесс поиска решения, поэтому представляется важным найти способ представления и формализации слабо структурированных субъективных знаний акторов.

2. Представление информации в сознании актора

В процессе осознания информации, связанной с проблемной ситуацией, акторы используют два механизма мышления.

Первый механизм (логический, или понятийный) определяется тем, что люди при запоминании используют ассоциации и стараются иерархически организовать свои знания, выстраивая системы понятий и связей между ними. Начиная с момента осознания наличия проблемной ситуации акторы включают логический механизм мышления, оперируя своими неявными персональными знаниями. Логическое мышление актора опирается на математическое, либо текстовое, либо табличное представление знаний. Сетевая логика конструирования знаний и тематического соотнесения смысловых структур удачно реализована при построении достаточно распространенных сегодня семантических сетей, которые были разработаны как модель представления знаний при решении задач разбора и понимания смысла естественного языка.

Логическое мышление характерно для традиционной культуры, когда в поисках выхода из сложившейся ситуации субъект выстраивает причинно-следственные связи, проводит анализ и в конце концов принимает решение. Отметим, что логический механизм мышления в большей степени применяется в хорошо структурированных (жестких) предметных областях, а проблемные ситуации на начальном этапе их осознания акторами тяготеют скорее к слабо структурированным областям, когда данные, не имеющие жесткой структуры, объединяются из разных гетерогенных источников [7].

Наблюдаемый сегодня переход от вербально-логического (понятийного) мышления к образному (визуальному) связан с широкомасштабным оттеснением традиционной культуры новым поколением, обладающим творческим «клиповым» мышлением, дающим возможность быстро схватывать картинку и решать задачи, не выстраивая причинно-следственные связи. Основные различия двух механизмов мышления хорошо описаны в [8] и представлены в таблице.

Различия между логическим мышлением и образным

Сравниваемые аспекты	Вербально-логическое (вербально-понятийное) мышление	Виртуальное (образное) мышление
Доминирующий мodus	Время	Пространство
Раскрывается как	Сукцессивность	Симультанность
Содержательные элементы	Понятия и связи	Образы и их трансформации
Отношения	Временные и причинные	Пространственно-структурные
Логика отношений	Логика вывода, логика причины и следствия	Логика части и целого

Второй механизм мышления (образный) более задействован для представления слабо структурированных и неструктурированных знаний о проблемной ситуации. Этот вид мышления отвечает за репрезентацию числовой и текстовой информации для решения интеллектуальных задач в виде графиков, таблиц или схем с опорой на внутренние визуальные образы. При этом визуальные образы являются конечным проявлением самого мышления, а не иллюстрацией мыслей субъекта [9] или простым отпечатком изображения в памяти. По определению В.П. Зинченко, образное мышление – это «человеческая деятельность, продуктом которой является порождение новых образов, создание новых визуальных форм, несущих определенную смысловую нагрузку и делающих значение видимым» [10]. Поэтому результатом визуализации знаний акторов является дизайн новых визуальных форм и порождение новых образов, несущих смысловую нагрузку в рамках данной проблемной ситуации, использующихся для передачи знаний от одного актора к другим и делающих видимыми знания участников проблемной ситуации. Т. е. можно говорить о внешней визуализации – представлении ситуации в сознании актора, и внутренней – последующем продуцировании визуального образа ситуации и демонстрации его прочим акторам.

Учитывая то, что подавляющую часть информации люди обрабатывают с помощью зрительного канала, а культура принятия решений испытывает крен в сторону клиповой культуры, основанной на наблюдении, применение методов и средств, способствующих визуализации знаний акторов, может стать ценным дополнением к представлению персональных онтологий в устном или письменном виде.

3. Методы визуализации

Современные средства визуализации позволяют представлять физические процессы и явления в форме, удобной для зрительного восприятия [11], перекодировав словесный или символический материал в пространственно-зрительные представления [12]. Применение инструментов визуализации акторами, погруженными в одну проблемную ситуацию, дополняет их коммуникации средствами, выполняющими функцию «социального клея», поддерживающего общение индивидумов внутри группы [13]. К сожалению, в настоящее время в ходе обыденных коммуникаций мы редко подкрепляем свои слова рисунками, пытаемся убедить в чем-то собеседника и объяснить свою точку зрения. Использование наглядных образов могло бы улучшить взаимопонимание в процессе изложения разных взглядов, обсуждения ситуации и, в конечном итоге, достижения консенсуса гетерогенными акторами.

Сегодня известно более сотни разнообразных инструментов визуальной репрезентации, от классических интеллектуальных карт до canvas-стратегий. Научная литература не дает однозначной классификации методов и средств визуализации [14], поэтому, проанализировав информацию из многочисленных источников, авторы взяли за основу «периодическую» таблицу, предложенную Ральфом Лэнглером и Мартином Ипплером (Ralph Lengler & Martin J. Eppler), в которой методы визуализации, применяемые в управлении, разделены на шесть групп. На рис. 3 изображены основные приемы графического представления в соответствии с [15]. В дальнейшем можно будет выбрать наиболее подходящие программные инструменты для представления знаний акторов в соответствии с интеллект-картой (рис. 3) из следующих групп методов визуализации:

– визуализация данных. Эта группа методов наиболее традиционна и используется не только профессионалами в разных областях знаний, но и неспециалистами для визуализации количественных данных в схематичном формате. В нее входят такие средства, как диаграммы, линейные графики, матрицы, гистограммы. Методы основаны исключительно на абстрактной количественной оценке данных и используются для сравнения, группировки и представления данных и знаний;

– визуализация информации. Эти методы позволяют строить модели, отражающие процесс познания, и помимо количественной оценки объектов содержат конкретное представление взаимосвязей между ними в системах. Применяются как средство усиления познания, т. е. позволяют нарисовать картинку, которые все мы рисуем, пытаясь решить какую-то сложную задачу. Это может быть блок-схема последовательности действий (некоторый алгоритм), семантическая сеть (показывающая причинно-следственные связи или наследование свойств), диаграмма «сущность – связь» (для описания логической структуры), сеть Петри (моделирующая процессы, протекающие в системе, и ее поведение) и пр.;

– визуализация концептов. Данная группа методов направлена в большей степени на качественный анализ проблем, идей, планов, которые подчиняются некоторым шаблонам и правилам построения и визуализации. Методы позволяют структурировать знания в выбранной предметной области. При визуализации концептов знания в основном представляются в двумерном пространстве, где концепты, обычно представленные прямоугольниками или кружками, связаны между собой направленными дугами, отражающими привязку концептов друг к другу. Отношения между парами концептов обозначаются с помощью кратких фраз и обычно состоят из глаголов, формирующих предложения для каждой пары понятий. Подобное изображение помогает вскрыть логическую структуру рассматриваемого сложного объекта. Примерами визуализации концептов являются как набирающие популярность сегодня карты памяти (mind map) и концептуальные схемы (concept map), так и широко известные диаграммы Ганта (подкрепляющие планирование действий), деревья решений (дающие наглядные инструкции, что нужно делать в зависимости от ситуации), сетевые графики (изображающие последовательность выполняемых работ), V-диаграммы (позволяющие смоделировать этапы жизненного цикла разработки сложного объекта) и пр.;

– визуализация стратегий. Это методы, направленные на то, чтобы облегчить анализ разных вариантов и принятие решений по выбору стратегий. Применяются для повышения качества анализа и разработки планов с учетом взаимосвязи компонентов и субъектов. Отличаются большим разнообразием и помогают визуализировать разные этапы разработки стратегии, от выявления причин проблемных ситуаций (диаграмма Исикавы, или «рыбья кость») и до построения дорожной карты реализации стратегии. При разработке инновационных объектов, идей, технологий применение морфологического ящика Цвикки позволяет изобразить все возможные элементы так, чтобы, по-разному комбинируя и сочетая их, создать нечто новое. Диаграмма родства позволяет сгруппировать решения, например полученные в результате мозгового штурма, по субъективным родственным признакам;

– визуальная метафора. Это интересная группа методов, использующих графическую форму и элементы легко узнаваемого естественного или рукотворного объекта (или легко распознаваемого действия или сюжета), что хорошо отражено в самих названиях диаграмм и прочих средств – «Айсберг», «Дерево», «Замок».

Такое метафорическое представление облегчает понимание и использование ассоциаций, связанных с изображением, и помогает передать дополнительную информацию о смысле сообщения. Данные методы основаны на использовании эффективных и простых шаблонов, помогающих понять сложные структуры;

– составная визуализация. Достаточно часто при использовании средств визуализации возникает желание или необходимость дополнить сухой график изображением, содержащим намек на то, что же этот график отражает. И наоборот, подтвердить то, что представлено на рисунке, количественными или качественными данными в виде таблицы, матрицы, схемы. В этих случаях можно прибегнуть к методам, названным в [15] составной визуализацией, которые сочетают в себе разные инструменты. Это могут быть карты знаний, содержащие метафорические элементы, интерактивные плакаты, обучающие карты и пр. В данной работе составная визуализация присутствует на рис. 1 и рис. 2, где схема (рис. 1) и интеллект-карта (рис. 2) дополнены инфографикой.

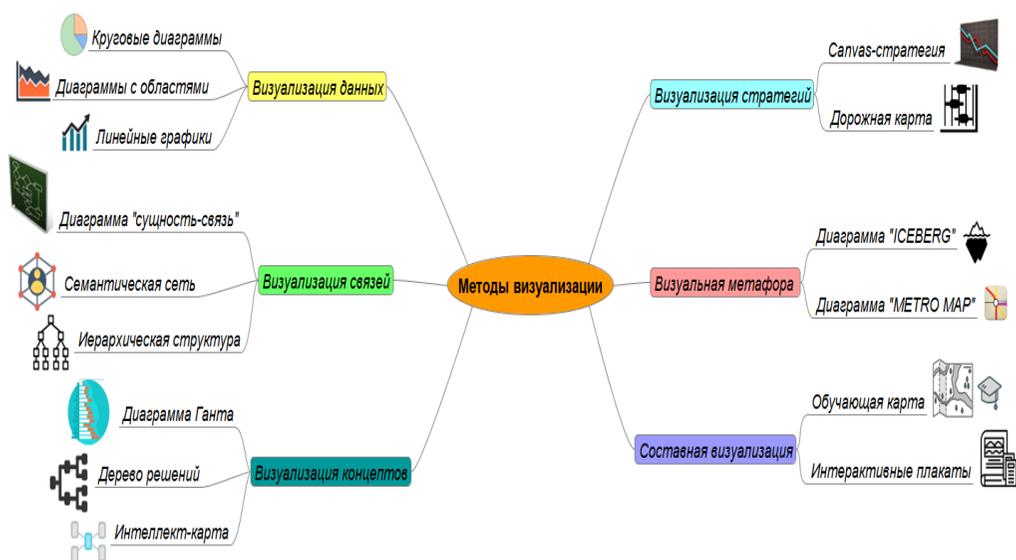


Рис. 2. Классификация методов визуализации

4. Выбор методов визуализации для представления знаний акторов

Методы когнитивной визуализации (рис. 2) позволяют акторам увидеть проблему с разных сторон, лучше сформулировать ее смысл, выявить в наборе данных новые знания.

Выбор метода визуализации в каждой конкретной ситуации, несомненно, определяется самой ситуацией, а также тем, какие акторы в ней оказались, каков их уровень грамотности (технической, информационной и пр.), какой информацией они владеют, какие персональные знания должны быть представлены другим участникам проблемной ситуации и т. д. Основными критериями выбора метода для применения в интересующем управлении являются простота использования и возможность применения неспециалистами.

Можно предположить, что на разных этапах взаимодействия друг с другом акторам потребуются разные инструменты для представления знаний (рис. 3).

На начальном этапе осознания наличия проблемной ситуации, когда субъект пытается найти решение самостоятельно, он пытается понять, что происходит, как

это можно преодолеть, и стремится сделать сложные, громоздкие и труднопони-
маемые вещи более простыми и понятными. Ассоциативный характер нашего
мышления и склонность к иерархическому представлению информации застав-
ляют человека рисовать деревья понятий, построенные на базе ассоциативных свя-
зей, снабживая их иными схемами и рисунками. Процесс графического отражения
логических связей поля знаний о проблемной ситуации помогает выстраивать ас-
социативные связи в сознании актора, дополнять модель ситуации новыми концеп-
тами. При таком переходе от последовательного изложения текста к сетевому
представлению образов внезапно всплывают неожиданные подсказки, заставляю-
щие задуматься и наталкивающие на непредсказуемые решения.

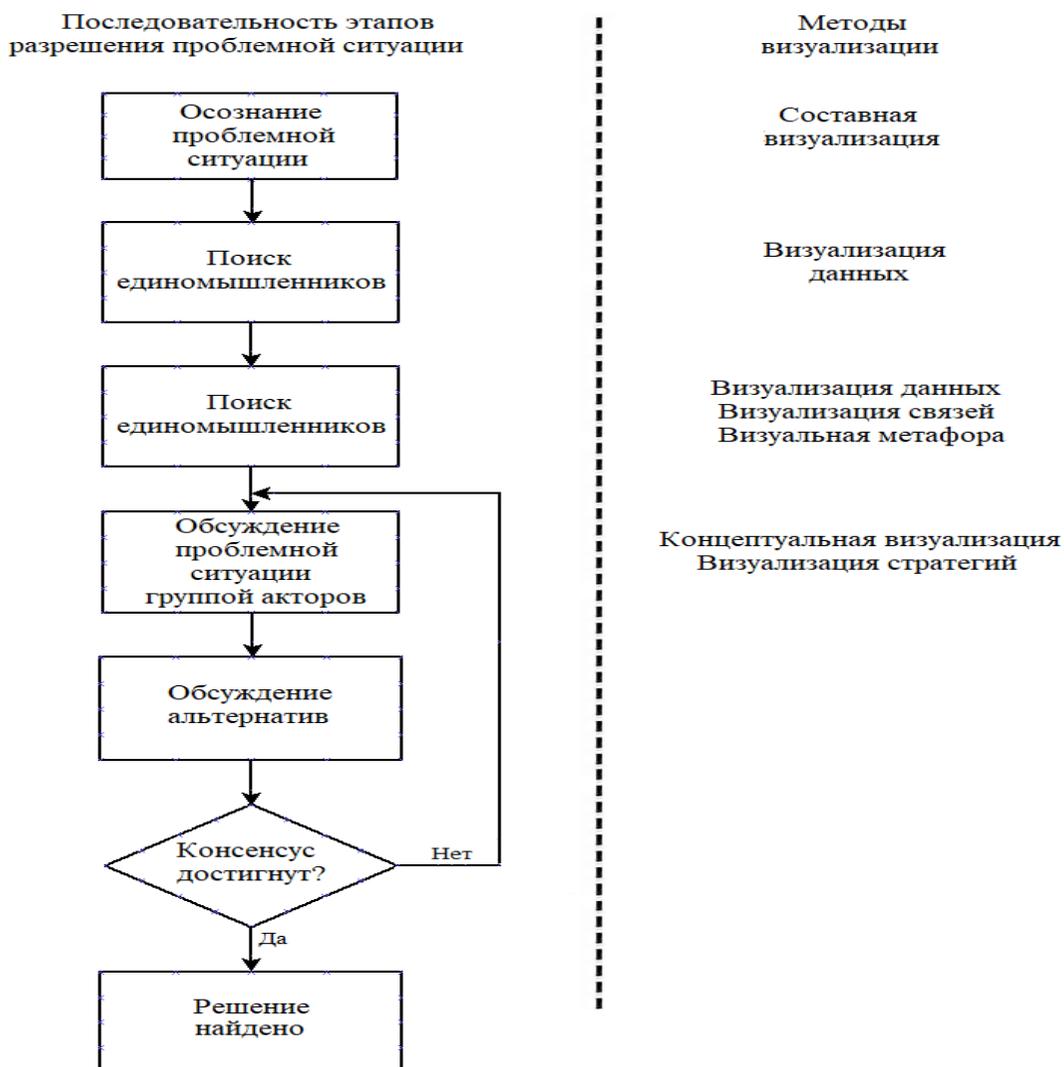


Рис. 3. Применение методов визуализации на разных этапах разрешения проблемных ситуаций

Если актер не смог найти выход из проблемной ситуации самостоятельно и начинает поиск единомышленников, он вынужден формулировать свое виденье проблемы так, чтобы его можно было передать другим субъектам. Здесь предпочтительно следует отдать таким формам общения, которые позволят минимизировать

время ведения переговоров. Быстрее понять суть освещаемой темы помогут изображения, диаграммы, схемы с кратким сопроводительным текстом. И если на первом этапе (осознания проблемы) актер мог рисовать картинки вручную, то для предъявления их другим участникам проблемной ситуации следует воспользоваться широко представленными сегодня программными средствами визуализации данных, информации и знаний.

Оказавшиеся в одной проблемной ситуации акторы, формируя единое смысловое пространство [16], многократно обсуждают ситуацию, дополняя свое видение знаниями других субъектов, постепенно приближаясь к ее разрешению. Применение методики интересубъективного управления на практике показало, что этот процесс может затянуться надолго по многим причинам, среди которых отметим следующие: неумение четко формулировать свои мысли, неоднозначное понимание одних и тех же слов разными актерами, недоверие к голословным утверждениям. Построение графической модели ситуации с помощью средств визуализации способствует сходимости мнений акторов благодаря тому, что визуальные модели позволяют общаться на одном языке, использовать общий набор символов, четко демонстрировать, что человек хочет сказать, подкреплять слова фактическим материалом, выделять основные мысли, передавать сложные мысли в упрощенном виде. Среди методов визуализации данных и связей, а также визуальных метафор, применимых на данном этапе поиска выхода из проблемной ситуации, следует особо выделить технологию интеллект-карт. Они достаточно эффективны при создании и моделировании логических структур, интеграции информации из нескольких источников, дополнении новыми знаниями уже имеющихся, для контроля и оценки понимания и диагностики проблемных зон предметной области представление, передающее все вопросы, касающиеся решаемой задачи, логически связанными. Таким образом, актер может охватить всю задачу в целом одним взглядом. Именно в процессе обсуждения и формирования коллективной онтологии интеллект-карты «обрастают» новыми концептами, дающими импульс для интуитивных решений и появления инновационных идей.

На заключительном этапе принятия решения у акторов возникает необходимость проанализировать несколько возможных вариантов выхода из проблемной ситуации. Визуальные средства облегчают процесс сравнения альтернативных решений. Так называемая диаграмма средства (которая обычно используется для подведения итогов мозговых штурмов, а обсуждения акторов таковыми, по сути, и являются) позволяет наглядно и просто представить эти решения, причем то, что обычно относится к недостаткам данного средства (субъективность распределения данных по родственным признакам), при интересубъективном управлении соответствует всей логике принятия решения актерами.

Заключение

Интерсубъективное управление разрешением проблемных ситуаций нацелено на включение людей в процессы управления социотехническими объектами, развития инновационной деятельности предприятий и разработки инновационных продуктов. Активные участники этих процессов (акторы) вырабатывают коллегиальные решения и формируют коллективную онтологию ситуации путем консенсуса в результате обсуждения проблемной ситуации и ведения полилога. На эффективность ведения переговоров влияют методы и средства, которые могут ис-

пользовать акторы для представления персональных знаний. Поэтому исследования авторов направлены на поиск инструментов эффективного обмена опытом и знаниями субъектов.

В качестве средств поддержки ведения переговоров и многократных итерационных обсуждений предлагается воспользоваться средствами визуализации данных, информации и знаний акторов. В основу выбора инструментария легла «периодическая» таблица методов, созданная Ральфом Лэнглером и Мартином Ипплером для применения в сфере управления. Заметим, что ранее в русскоязычной литературе отсутствовало однозначное и понятное изложение предложенной системы. Выше приведен авторский анализ и подробное описание методов визуализации, разделенных на шесть групп (визуализация данных, визуализация связей, визуализация концептов, визуализация стратегий, визуальная метафора и составная визуализация), подкрепленное примерами применения различных средств визуализации.

Результатом проведенной работы является выбор методов когнитивной визуализации знаний акторов в зависимости от этапа процесса интересубъективного управления разрешением проблемной ситуации. Для каждого этапа предложено использование разных групп методов из «периодической» таблицы.

В ходе дальнейшего теоретического изучения и практического приложения методов визуализации знаний акторов сделанные предложения, очевидно, будут откорректированы и усовершенствованы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Vittikh V.A.* Evergetics: Science of Intersubjective Management Processes in Everyday Life. *International Journal Management Concepts and Philosophy*. 2016. Vol. 9. Issue 2. Pp. 63–72.
2. *Vittikh V.A.* Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. *Group Decision and Negotiation*. 2015. Vol. 24. Issue 6. Pp. 949–956.
3. *Vittikh V.A.* Introduction to the Theory of Intersubjective Management. *Group Decision and Negotiation*. 2015. Vol. 24. Issue 1. Pp. 67–95.
4. *Bumtux B.A.* Принцип дополнительности в науке о процессах управления в обществе // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. 2016. № 4 (52). С. 15–21.
5. *Moiseeva T., Smirnov S.* Principles of Managing the Process of Innovative Ideas Genesis. In: Dolinina O., Brovko A., Pechenkin V., Lvov A., Zhmud V., Kreinovich V. (eds). *Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT 2019. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. № 199. Pp. 15–25.
6. *Giddens A.* *Modernity and self-identity: Self and society in the late modern age*. Cambridge: Polity Press, 1991.
7. *Wang K., Liu H.* Schema Discovery for Semistructured Data, In Proc. 1997, Pp. 271–274. URL: <https://studylib.net/doc/13739108/schema--discovery-for--semistructured-data--ke--wang>.
8. *Михеев В.А., Шевырев А.В., Шаламова Н.Г., Федотова М.А.* Визуальное мышление в аналитике: проблемы, возможные подходы и способы овладения // *Материалы Первой всероссийской конференции «Аналитика развития и безопасности страны: реалии и перспективы»*. – М.: Агентство печати Столица Москва, 2014. – С. 260–269.
9. *Арнхейм Р.* Искусство и визуальное восприятие / пер. с англ. В.Л. Самохина; общ. ред. В.П. Шестакова. М.: Прогресс, 1974. 392 с.
10. *Зинченко В.П.* Развитие зрения в контексте перспектив общего духовного развития человека // *Вопросы психологии*. 1988. № 6. С. 15–30.
11. *Етшикин Н.И.* Исторический словарь галлицизмов русского языка. М.: ЭТС, 2010. 5140 с.
12. *Олешков М.Ю., Уваров В.М.* Современный образовательный процесс: основные понятия и термины. М.: Компания Спутник+, 2006. 191 с.
13. *Henderson K.* Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering. *Science, Technology, & Human Values*. 1991. Vol. 16. No. 4. Pp. 448–473.
14. *Гаврилова Т.А., Алсуфьев А.И., Гринберг Э.Я.* Визуализация знаний: критика Сент-

- Галленской школы и анализ современных трендов // Бизнес-информатика. 2017. № 3 (41). С. 7–19.
15. Eppler Martin, Burkhard Remo [Knowledge Visualization]. <http://www.knowledgemediamedia.org/modules/pub/view.php/knowledgemediamedia-67> (accessed May 2, 2020).
 16. Бумтух В.А., Моисеева Т.В. Интерсубъективное управление: от теории к практике // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVIII Междунар. конф. – Самара: Офорт, 2016. – 464 с.
 17. Jonassen D.H., Beissner K., Yacci M.A. [Structural knowledge: Techniques for conveying, assessing, and acquiring structural knowledge]. <http://richarddagan.com/cogmap.php> (accessed April 24, 2020).

Статья поступила в редакцию 15 января 2020 г.

ABOUT METHODS OF ACTORS KNOWLEDGE VISUALIZATION IN INTERSUBJECTIVE MANAGEMENT OF PROBLEM SITUATIONS SOLVING

T.V. Moiseeva¹, Yu.S. Mukhanov²

¹Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, Russian Federation

²Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
77, Moscow highway str., Samara, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the specifics of intersubjective management of problem situations solving where actors are employees of socio-technical objects. The difference between traditional management of socio-technical objects and intersubjective one is shown. The importance of the subject is explained by the fact that the result of actors' problem situations solving could be the basis for the further development of innovative products manufactured by socio-technical objects. The difference between the role of people-subjects of the problem situations and people-objects is shown. The importance of decision-making management methodology creation in the subject - subjective relations is noted. It is proposed to supply the methodology of the intersubjective management theory with methods of actors' knowledge visualization. Therefore, the purpose of this paper is to discover existing methods of knowledge visualization as the means of mental processes enhancing, and to select some methods that could support and facilitate the actors decision-making process. Two cognitive mechanisms lying in the basis of actors' knowledge presentation are considered. It is shown that figurative thinking based on spatial-structural relationships lies in the basis of the creation of problem situation visual images. The main visualization methods used in management are considered. The "periodic" table proposed by Ralph Lengler and Martin J. Eppler, where all methods are divided into six groups (data visualization, visualization of relationships, concept visualization, strategy visualization, metaphor visualization and compound visualization), was chosen as the basis for visualization methods systematizing. The author's analysis and detailed description of these methods were carried out, supported by examples of various visualization tools application. Cognitive visualization methods for representing the knowledge of actors has been selected. For each stage of problem situations solving process the proper units from different groups of methods of the "periodic" table are proposed.*

Keywords: *intersubjective management, problem situation, actor, knowledge management, knowledge visualization, visualization methods.*

*Tatiana V. Moiseeva (Ph.D. (Econ.)), Associate Professor.
Yury S. Mukhanov, Undergraduate student.*

1. *Vittikh V.A.* Evergetics: Science of Intersubjective Management Processes in Everyday Life. *I*
2. *Vittikh V.A.* Heterogeneous Actor and Everyday Life as Key Concepts of Evergetics. *Group Decision and Negotiation*. 2015. Vol. 24. no. 6. Pp. 949–956.
3. *Vittikh V.A.* Introduction to the Theory of Intersubjective Management. *Group Decision and Negotiation*. 2015. Vol. 24. no. 1. Pp. 67–95.
4. *Vittikh V.A.* The principle of complementarity in the science of management processes in society. *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki*. 2016. no. 4 (52). Pp. 15–21. (In Russian).
5. *Moiseeva T., Smirnov S.* Principles of Managing the Process of Innovative Ideas Genesis. In: Dolinina O., Brovko A., Pechenkin V., Lvov A., Zhmud V., Kreinovich V. (eds). *Recent Research in Control Engineering and Decision Making. ICIT 2019. Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. no 199. Pp. 15–25.
6. *Giddens A.* *Modernity and self-identity: Self and society in the late modern age*. Cambridge, Polity Press, 1991.
7. *Wang K., Liu H.* Schema Discovery for Semistructured Data. *KDD-97 Proceedings*. 1997. Pp. 271–274. <https://studylib.net/doc/13739108/schema--discovery-for--semistructured-data--ke--wang> (accessed April 24, 2020).
8. *Mithev V.A., Shevryev A.V., Shalamova N.G., Fedotova M.A.* Visual thinking in analytics: problems, possible approaches and ways to master. *Materialy Pervoy vserossijskoj konferencii Analitika razvitiya i bezopasnosti strany: realii i perspektivy*. OOO Agentstvo pechati Stolica, Moscow, 2014. Pp. 260–269. (In Russian).
9. *Arnhejm R.* *Iskusstvo i vizual'noe vospriyatie [Art and visual perception]*. Moscow, Progress, 1974. 392 p. (In Russian).
10. *Mnchenko V.P.* The development of vision in the context of the prospects for the overall spiritual development of man. *Voprosy psihologii*. 1988. no. 6. Pp. 15–30. (In Russian).
11. *Epishkin N.I.* *Istoricheskij slovar' gallicizmov russkogo yazyka [Historical Dictionary of Gallicisms of the Russian Language]*. Moscow, ETS, 2010. 5140 p.
12. *Gleshkov M.Yu., Uvarov V.M.* *Sovremennyj obrazovatel'nyj process: osnovnye ponyatiya i terminy [The modern educational process: basic concepts and terms]*. Moscow, Kompaniya Sputnik+, 2006. 101 p. (In Russian).
13. *Henderson K.* Flexible sketches and inflexible data bases: Visual communication, conscription devices, and boundary objects in design engineering. *Science, Technology, & Human Values*. 1991. Vol. 16. no. 4. Pp. 448–473.
14. *Gavrilova T.A., Alsu'ev A.I., Grinberg E.YA.* Visualization of knowledge: criticism of the St. Gallen School and analysis of modern trends. *Biznes-informatika*. 2017. no 3 (41). Pp. 7–19. (In Russian).
15. *Eppler M., Burkhard R.* [Knowledge Visualization]. <http://www.knowledgemia.org/modules/pub/view.php/knowledgemia-67> (accessed May 2, 2020).
16. *Vittikh V.A., Moiseeva T.V.* Intersubjective Management: from Theory to Practice. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah: trudy XVIII Mezhdunar. konf. Samara, Ofort*, 2016. Pp. 53–62. (In Russian).
17. *Jonassen D.H., Beissner K., Yacci M.A.* [Structural knowledge: Techniques for conveying, assessing, and acquiring structural knowledge]. <http://richarddagan.com/cogmap.php> (accessed April 24, 2020).

a
n
d

P
h
i
l
o
s
o
p
h
y
.

2
0
1
6

УДК 004.382

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ В ПОДРАЗДЕЛЕНИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Р.А. Учайкин, С.П. Орлов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: uchaykinra@yandex.ru, orlovsp1946@gmail.com

***Аннотация.** Рассматривается задача оценки эффективности компьютерного оборудования, используемого в проектных и конструкторских отделах крупного машиностроительного предприятия. Показано, что многообразие решаемых задач, различие конфигураций компьютеров и кадрового состава отделов затрудняет выявление функциональных связей между критериями эффективности и характеристиками вычислительной техники. Предложено использовать метод анализа среды функционирования – Data Envelopment Analysis, позволяющий проводить сравнительный анализ гетерогенных производственных единиц и определять направления достижения заданных показателей работы. В статье предложена системная модель отдела предприятия. В модели учитываются следующие параметры подразделений и компьютерной техники: число сотрудников, количество, номенклатура и производительность компьютеров, суммарная стоимость компьютерного оборудования, удельный объем выполняемых в отделе задач. Проведен анализ взаимного влияния различных входных и выходных параметров. Определены неэффективные подразделения и получены целевые значения их параметров, необходимые для дальнейшего повышения эффективности. На двухгодичном периоде с применением индекса Малмквиста выявлены прогрессирующие отделы и отделы, в которых снизилась эффективность компьютерной техники. Представлены графики и диаграммы, характеризующие рассматриваемые подразделения при различных условиях. Сделаны выводы по оснащению подразделений новой компьютерной техникой и перераспределению ресурсов.*

***Ключевые слова:** системный анализ, эффективность, использование компьютерной техники, анализ среды функционирования, индекс Малмквиста.*

Введение

Задача оптимального использования компьютерной техники на промышленных предприятиях является одной из важнейших в информационных технологиях. Современное машиностроительное предприятие, выпускающее сложную технику, как правило, имеет в структуре комплекс проектных и конструкторских подразделений. Задачи таких отделов обусловлены как созданием новых образцов изделий, так и модернизацией выпускаемой продукции [1, 2].

В настоящее время широко используются средства автоматизации процессов проектирования и производства, представляющие собой сложные программные

Учайкин Роман Александрович, аспирант.

Орлов Сергей Павлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Вычислительная техника».

системы, которые устанавливаются на мощные рабочие станции с высокой производительностью и большим объемом памяти.

В работах [3, 4] разрабатывались методы распределения средств вычислительной техники в информационных системах предприятий. Авторами данной статьи предложен подход к постановке задачи оптимизации распределения компьютерного оборудования на машиностроительном предприятии [5, 6]. Однако решение такой задачи требует предварительной оценки, насколько эффективно используется уже имеющаяся в подразделениях вычислительная техника. Сложность такой оценки состоит в том, что необходимо сравнивать отделы, разнородные по составу и компетенциям сотрудников, выполняемым проектам и номенклатуре используемой компьютерной техники. Известен метод анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis – DEA), который успешно применялся для сравнения разнородных предприятий [7, 8]. В дальнейшем перспективность метода DEA была подтверждена и в других задачах: использование финансовых ресурсов, анализ водообеспечения регионов, оценка эффективности программных систем и др. [9–11].

В данной статье рассматривается постановка и решение задачи формальной оценки эффективности использования компьютеров в отделах предприятия с целью планирования их оптимального распределения и эксплуатации.

Задача оценки использования компьютерной техники

Основой эффективного управления средствами вычислительной техники является автоматический учет существующей номенклатуры средств компьютерной техники. Существуют программные средства, которые устанавливаются на компьютерах и автоматически выполняют мониторинг их характеристик: производительность процессора и видеокарт, использование памяти, загрузку подсистемы ввода-вывода др. Кроме штатных средств ОС Windows 8 и 10, наиболее распространены программы AIDA64, 3DMark, Cinebench, которые ориентированы на анализ работы графических приложений [12–14]. Это позволяет сформировать представительный набор параметров, использующийся для оценки эффективности работы компьютеров при выполнении проектных задач.

Метод DEA основывается на постановке задачи дробно-рационального программирования и сведении ее затем к задаче линейного программирования. Методология заключается в том, что на первом этапе определяется набор из n конструкторских и проектных отделов ($DMU_i, i=1, \dots, n$) и векторы их входных параметров (входных факторов) $x_i = (x_1^i, \dots, x_m^i)$ и выходных параметров $y_i = (y_1^i, \dots, y_r^i)$. Состав компьютеров в отделе, их конфигурации и характеристики напрямую влияют на способность выполнять проектные работы. Поэтому в векторы x_i и y_i должны входить как элементы показатели качества проектного процесса и параметры компьютерного оборудования. В результате образуются матрицы X размером $m \times n$ и Y размером $r \times n$, которые содержат данные для дальнейшего анализа.

Измерение эффективности проводится путем нахождения оптимального взвешенного соотношения между выходными параметрами и входными факторами совокупности рассматриваемых DMU. При этом критерий эффективности наблюдаемого подразделения лежит на отрезке $[0, 1]$. Базовая модель CCR была предложена Чарнесом – Купером – Роудсом и направлена на нахождение границы эффективности в многомерном пространстве параметров DMU. Позиция объекта относительно границы дает возможность не только оценить его эффективность, но и найти величину изменений параметров, которые выводят объект на границу.

Используются две основные модели:

- CCR_{output} -output-ориентированная модель, в которой целевая функция пытается пропорционально увеличить выходной параметр DMU в направлении границы эффективности;
- CCR_{input} -input-ориентированная модель, в которой целевая функция пытается пропорционально уменьшить входной фактор DMU до границы эффективности.

В настоящей статье рассматривается деятельность конструкторских и проектных отделов при условии неизменности производственного плана предприятия в целом. Поэтому целесообразно находить искомые соотношения, изменяя входные параметры при сохранении требуемого уровня выходных параметров отделов. В связи с этим в качестве базовых моделей для исследования выбраны input-ориентированные модели.

Модель CCR_{input} с постоянным эффектом масштаба (CRS) представлена следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\theta, \lambda} \theta, \\ -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ \theta x_i - X\lambda \geq 0, \\ \lambda \geq 0, \end{array} \right\} \quad (1)$$

где θ – интегральный критерий эффективности исследуемого подразделения;
 X – матрица входов;
 Y – матрица выходов;
 x_i и y_i – вектор-столбцы индивидуальных входов и выходов для i -го отдела в X и Y соответственно;

λ – полуположительный вектор (фактор взвешивания), $\lambda_i \geq 0, \forall i = 1, \dots, n$.

В ВСС модели принимается переменный эффект масштаба (VRS). При этом изменение входного фактора может привести к непропорциональному изменению выходного параметра, и тогда большее число DMU может увеличить эффективность.

Эта модель отличается от модели (1) тем, что добавлено ограничение $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, которое можно записать в виде $e\lambda = 1$, где e – вектор-строка с единичными элементами, а λ – вектор-столбец полуположительных значений.

Модель VCC_{output} представлена в виде

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\theta_B, \lambda} \theta_B, \\ -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ \theta_B x_i - X\lambda \geq 0, \\ e\lambda = 1, \\ \lambda \geq 0. \end{array} \right\} \quad (2)$$

Оценка эффективности использования компьютерной техники в проектных и конструкторских отделах

Будем рассматривать совокупность из двух конструкторских отделов К1 и К2 и трех проектных отделов П1, П2 и П3. Отделы оснащены компьютерами различ-

ной конфигурации и решают различные задачи, которые будут оцениваться условными объемами выполняемых операций.

Ключевые показатели эффективности KPI (Key Performance Indicators) в данном случае приняты следующие:

Y1 – суммарная стоимость компьютерной техники в отделе (тыс. рублей);

Y2 – удельный объем выполняемых задач на одного сотрудника.

Входные параметры оцениваемых подразделений описывают степень оснащения компьютерной техникой, сложность проектных и производственных процессов:

X1 – число сотрудников в подразделении;

X2 – количество компьютеров в подразделении;

X3 – средняя производительность компьютеров ($\Gamma_{\text{флопс}}$);

X4 – объем задач, выполняемых в подразделении;

X5 – количество графических рабочих станций конфигурации № 1;

X6 – количество графических рабочих станций конфигурации № 2;

X7 – количество персональных компьютеров инженерной конфигурации.

Приведенные выше параметры рассматриваются за годовой период. В табл. 1 и 2 приведены значения параметров за два года. Это позволяет применить методику DEA для оценки развития отделов, в частности определить индекс Малмквиста для анализа изменений эффективности в течение времени.

Таблица 1

Входные параметры для оценки конструкторских и проектных отделов в период 2017 и 2018 гг.

Входные параметры	К1		К2		П1		П2		П3	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
X1	40	44	32	29	40	51	90	81	44	54
X2	48	52	32	27	40	54	82	93	45	59
X3	6886	7213	4800	4762	6455	7705	10200	11891	7550	8890
X4	5	7	5	5	8	15	10	12	12	16
X5	13	15	5	5	9	20	30	30	20	25
X6	23	25	12	12	23	20	39	50	11	15
X7	12	12	15	15	8	14	13	13	14	19

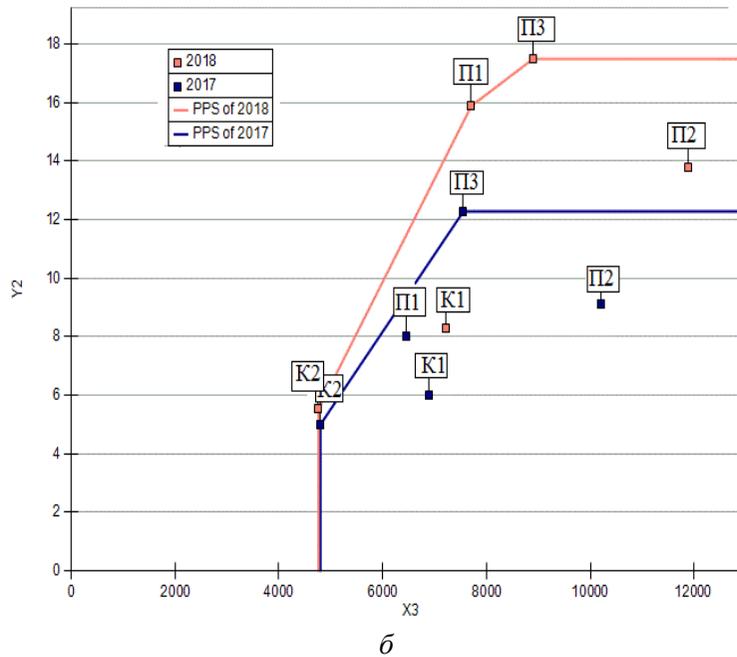
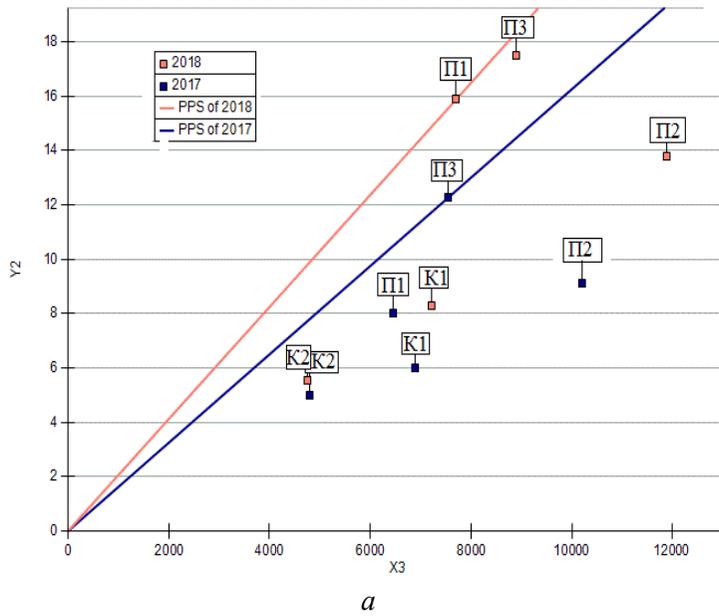


Рис. 1. Диаграмма положения отделов относительно границ эффективности в зависимости от удельных объемов выполняемых задач (Y2) и производительности компьютеров (X3):
 а – модель CCR_{input} с NDRS и суперэффективностью;
 б – модель BCC_{input} с VRS

Выходные параметры для оценки конструкторских и проектных отделов в период 2018 и 2019 гг.

Выходные параметры	DMU									
	K1		K2		П1		П2		П3	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
Y1	3664	4040	2280	2355	3192	4000	6310	7420	3075	4140
Y2	6	8,27	5	5,52	8	15,88	9,11	13,78	12,27	17,48

В процессе проведенных исследований была использована программа PIM DEASoft версии 3 [15], которая выполняет решение задач линейного программирования для моделей CCR и BCC различных модификаций [8]:

- с постоянным эффектом масштаба (CRS);
- с переменным эффектом масштаба (VRS);
- с неуменьшаемым эффектом масштаба (NDRS);
- с применением анализа суперэффективности;
- с использованием переменной резерва.

Исследование эффективности проектных и конструкторских отделов предприятия проводилось на input-ориентированной модели CCR_{input} с неуменьшаемым эффектом масштаба NDRS, а также на модели BCC_{input} с VRS. При этом использовался режим нахождения границы суперэффективности Simple Super Efficiency.

Метод DEA предполагает построение границы эффективности в виде поверхности в многомерном пространстве входных и выходных параметров. В нашем случае это девятимерное пространство, и граница образована пересечением гиперплоскостей. Для удобства анализа программа PIM DEASoft предоставляет возможность анализировать различные сечения этого пространства параметров:

- один вход – один выход;
- два входа – один выход;
- два выхода – один вход.

Различие моделей CCR с постоянным эффектом масштаба и BCC с переменным эффектом масштаба иллюстрируется на рис. 1, где показана связь входа X3 (производительность компьютеров) с выходом Y2 (удельный объем выполняемых задач).

В первом случае (рис. 1 а) в 2017 году граница эффективности образуется отделом П3, а в 2018 году – отделом П1. Используя модель BCC, можно повышать эффективность путем непропорционального изменения входных параметров. На рис. 1 б для 2017 года граница образована отделами К2 и П3, а в 2018 году – отделами К2, П1 и П3. Очевидно, что наименее эффективны те отделы, которые расположены далеко от границы: конструкторский отдел К1 и проектный отдел П2.

Анализ результатов моделирования по методу DEA

Проведенное исследование позволяет определить стратегию развития конструкторских и проектных отделов предприятия в следующих аспектах:

- оптимизация численности сотрудников в соответствии с объемом задач;
- определение необходимого количества компьютерной техники для выполнения задач в отделе и уточнение числа различных конфигураций компьютеров;
- перераспределение компьютерного оборудования между отделами;
- увеличение или уменьшение загрузки отделов в целом и оптимизация удельного объема выполняемых задач на одного сотрудника.

Моделирующая программа DEA представляет графическую информацию в виде диаграмм расположения параметров отделов в многомерном пространстве. Имеется возможность анализировать все объекты и различные сочетания входных и выходных параметров. В данной статье рассмотрен пример анализа эффективности для конструкторского отдела К2.

На рис. 2 изображены две границы эффективности (2017 и 2018 гг.), при этом во внимание принимаются значения: X_1 – число сотрудников в отделе, Y_1 – суммарная стоимость компьютеров, Y_2 – удельный объем задач в отделе. Отделы, расположенные на границах, являются эффективными на рассматриваемых периодах. В 2017 году это были отделы К1 и П3, а в 2018 году – отделы К1 и П1, П2, П3. В то же время отдел К2 не улучшил свое положение, несмотря на увеличение числа сотрудников в 2018 году.

Показателен также результат для входного параметра X_7 – число компьютеров инженерной (облегченной) конфигурации (рис. 3). Видно, что выходные параметры отдела К2 практически не изменились, но расстояние до границы эффективности в 2018 году увеличилось.

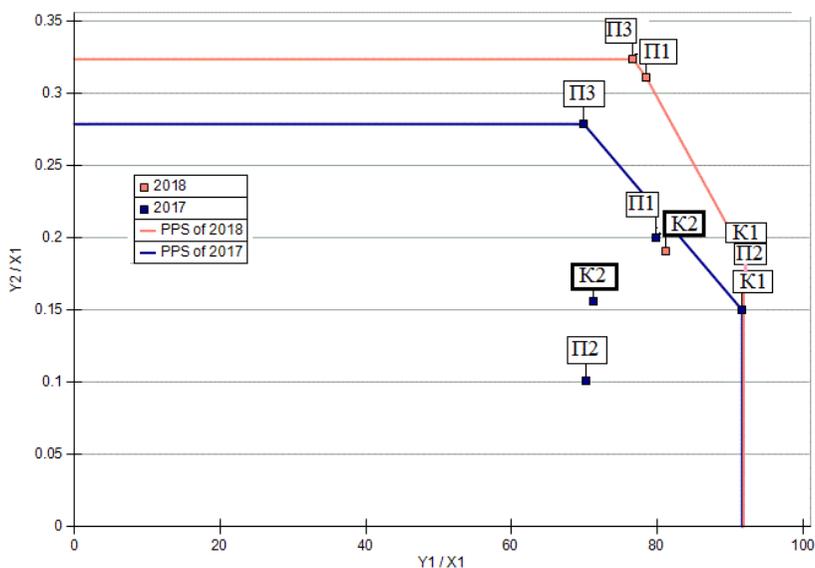


Рис. 2. Положение отдела К2 относительно границ эффективности в 2017 и 2018 гг. в зависимости от параметров X_1 , Y_1 и Y_2

Можно сделать вывод о неэффективности использования в отделе К2 маломощных инженерных компьютеров.

Для вывода отдела К2 на границу эффективности следует изменить ряд параметров. На рис. 4 показана граница для отделов в 2018 году в плоскости параметров: Y2 – удельный объем выполняемых задач и X7 – количество инженерных компьютеров.

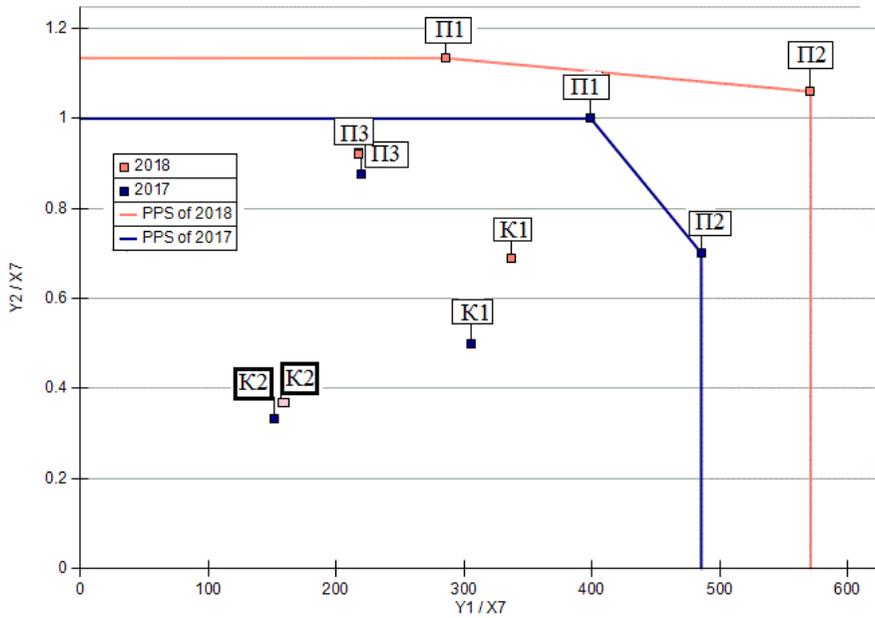


Рис. 3. Положение отдела К2 относительно границ эффективности в 2017 и 2018 гг. в зависимости от параметров X7, Y1 и Y2

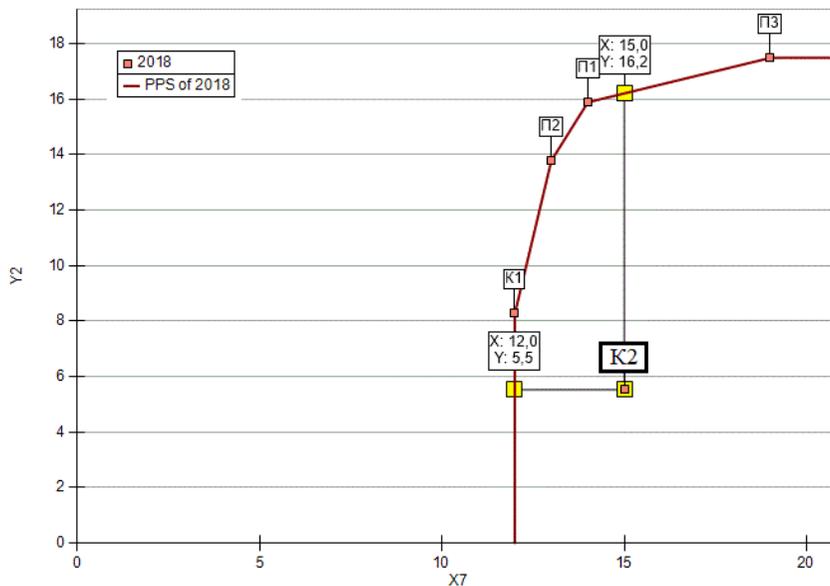


Рис. 4. Целевые изменения параметров X7 и Y2 отдела К2 для выхода на границу эффективности

Координаты положения К2 на границе показывают, какие целевые изменения могут быть сделаны. Первый вариант – уменьшить число компьютеров с 15 до 6 при неизменном объеме выполняемых работ. Второй вариант – оставить то же количество маломощных компьютеров и значительно загрузить отдел новыми задачами ($Y_2=16$). При этом удельный объем задач должен возрасти почти в 3 раза. Второй вариант в условиях существующей производственной программы предприятия нереален, в связи с этим принимается первый вариант.

Аналогичная информация имеется и для других отделов предприятия, что позволяет получить данные о целевых значениях всех параметров всех рассматриваемых отделов.

Анализ эффективности подразделений в различные периоды времени

Были рассмотрены два периода развития отделов: 2017 и 2018 годы. Для оценки прогресса отделов рассчитывался индекс Малмквиста.

Индекс Малмквиста для input-ориентированной ССR модели формируется следующим образом:

$$MI(y_{t+1}, x_{t+1}, y_t, y_t) = \frac{D_{CRS}^{t+1}(y_{t+1}, x_{t+1})}{D_{CRS}^t(y_t, x_t)} \left[\frac{D_{CRS}^t(y_{t+1}, x_{t+1})}{D_{CRS}^{t+1}(y_{t+1}, x_{t+1})} \times \frac{D_{CRS}^t(y_t, x_t)}{D_{CRS}^{t+1}(y_t, x_t)} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где x_t и x_{t+1} – входные векторы;

y_t и y_{t+1} – выходные векторы в периоды t и $t+1$;

D_{CRS}^t, D_{CRS}^{t+1} – input-ориентированные функции дистанции по отношению к технологии производства в периоды времени t и $t+1$.

CRS показывает, что рассматривается постоянный эффект масштаба. Функции дистанции определяются по методике, изложенной в работах [7, 16].

Индекс Малмквиста (3) может быть также представлен в виде произведения

$$MI = EC \times TC,$$

где TC – технические изменения (технический прогресс на двух периодах времени);

EC – изменение эффективности.

В табл. 3 приведены полученные значения MI, TC и EC.

Таблица 3

Индекс Малмквиста для конструкторских и проектных отделов (2017–2018 гг.)

DMU	TC	EC	TFPG(MI)
K1	0,96	1	0,96
K2	0,82	1	0,82
П1	0,95	1	0,95
П2	1,1	1	1,1
П3	1,23	1	1,23

Величина индекса $MI > 1$ свидетельствует о прогрессе в производительности рассматриваемого DMU в период от t до $t+1$, тогда как $MI = 1$ или $MI < 1$ соответствуют неизменному состоянию или снижению фактора производительности.

Это подтверждает сделанный ранее вывод о неэффективном использовании компьютерной техники в некоторых отделах (К1, К2, П1) при переходе от 2017 к 2018 гг.

В результате анализа на PIM DEA моделях были получены целевые значения параметров отделов, которые необходимо реализовать для повышения эффективности использования компьютерного оборудования (табл. 4). В таблице приняты обозначения: «Цель» – значение параметра, которое следует планировать; δ – процентная величина изменения данного параметра по отношению к существующему значению.

Таблица 4

Целевые значения параметров отделов по результатам анализа CCR модели эффективности в 2018 г.

Входные параметры	К1		К2		П1		П2		П3	
	Цель	$\delta, \%$	Цель	$\delta, \%$	Цель	$\delta, \%$	Цель	$\delta, \%$	Цель	$\delta, \%$
X1	46	4,7	27	-6,15	55	7,37	81	0	56	3,9
X2	49	-5,3	30	14	60	12	95	2,7	59	0
X3	7051	-2,2	4160	-12,6	8800	14	13247	11,4	8481	-4,6
X4	7	0	6	8	14	-4	13	7,14	16	0
X5	16	11	11	9,4	24	21	27	-8,17	22	-11,9
X6	25	0	14	13,8	19	-3,6	46	-8,1	22	46,7
X7	13	11	6	-60	17	21	22	69,5	15	-18,9
Y1	4040	0	2355	0	4377	9,45	7420	0	4403	6,35
Y2	8,27	0	6,05	9,6	16	0	15	10,2	17,48	0

В частности, для рассмотренного ранее конструкторского отдела К2 имеем следующий план развития:

- уменьшение числа сотрудников с 29 до 27 человек;
- уменьшение количества маломощных компьютеров до 6 шт.;
- увеличение числа компьютеров с повышенной производительностью до 25 шт. (дополнительно 3 графические станции) при сохранении суммарной стоимости техники Y1;
- увеличение числа выполняемых задач и, следовательно, увеличение удельного объема работ Y2.

Решение для системной модели DEA в виде табл. 4 дает информацию для планирования распределения ресурсов. Рассмотрим обеспеченность всех отделов компьютерами с одинаковыми конфигурациями. Введем переменную, описывающую резерв компьютерной техники:

$$R^m = -\sum_{n=1}^N d_n^m, \quad m \in \{5, 6, 7\},$$

где d_n^m – целевое изменение единиц ресурсов (X5, X6 или X7);

N – количество отделов.

Если $R^m = 0$, то возможно перераспределение ресурсов между отделами, при $R^m < 0$ следует приобретать оборудование, а при $R^m > 0$ образуется резерв.

Анализ табл. 4 показывает, что $R^5 = R^7 = 0$, а $R^6 = -4$. Таким образом, компьютерные графические станции с конфигурацией № 1, а также инженерные компьютеры могут быть перераспределены между отделами без приобретения новой техники. Графические станции с конфигурацией № 2 перераспределяются между отделами П1, П2 и П3, причем необходимо приобрести еще 4 компьютера.

Заключение

Разработанная системная модель обеспечивает достоверную оценку использования компьютерной техники в конструкторских и проектных отделах предприятия. Важным результатом является применимость подхода к анализу разнородных подразделений. Полученные с помощью модели данные об использовании компьютеров и рациональном изменении структуры компьютерного обеспечения отделов служат основой для постановки и решения задачи оптимизации распределения средств вычислительной техники с учетом большего числа параметров и ограничений [5]. Методика позволяет повысить эффективность использования вычислительной техники и снизить затраты на эксплуатацию. Предложенный подход может быть использован для сравнительной оценки влияния других факторов, определяющих производительность подразделений крупного предприятия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев Р.Б., Калянов Г.Н., Лёвочкина Г.А. Управление развитием информационных систем. М.: ИНТУИТ, 2016. 507 с.
2. Mosleh M., Ludlow P., Heydari B. Resource allocation through network architecture in systems of systems: A complex networks framework. Proc. of the 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, USA. IEEE Xplore. 2016. P. 1–5.
3. Аюад М., Бориц В.В., Лазаренко А.В., Минин Ю.В. Оптимизационные задачи выбора и распределения ресурсов в информационных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 1. С. 43–46.
4. Дидрих В.Е., Дидрих И.В., Громов Ю.Ю., Ивановский М.А. Задача распределения ресурсов в сетевой информационной системе // Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22. № 4. С. 541–549.
5. Учайкин Р.А., Орлов С.П. Задача распределения средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2019. Вып. 4 (69). С. 84–98.
6. Учайкин Р.А., Орлов С.П. Автоматизированное управление использованием средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. Т. 12: в 3 ч. Ч. 2 / под общ. ред. А.А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 81–87.
7. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd Edn. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
8. Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J. Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, pp. 1–39.
9. Пискунов А.А., Иванюк И.И., Лычев А.В., Кривоножко В.Е. Использование методологии АСФ для оценки эффективности расходования бюджетных средств на государственное управление в субъектах Российской Федерации // Вестник АККОР. 2009. № 2. С. 28–36.
10. Нечаев Д.А., Орлов С.П. Комплексная оценка и классификация объектов водоснабжения регионов // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2013. Вып. 1(37). С. 14–21.
11. Рыбакова И.А., Орлов С.П. Сравнительный анализ эффективности использования предприятиями CRM-систем // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2018. Вып. 1 (57). С. 31–37.
12. AIDA64. URL: <https://www.aida64.com/products/aida64-engineer> (дата обращения 08.12.2019).
13. 3DMark. URL: <https://benchmarks.ul.com/3dmark> (дата обращения 23.11.2019).
14. Cinebench. URL: <https://www.maxon.net/en-gb/products/cinebench-r20-overview> (дата обращения 01.12.2019).

15. PIM-DEA. URL: <http://www.deasoftware.co.uk/> (дата обращения 21.10.2019).
16. Лиссунца А., Бабичева Т. Теоретические основы анализа продуктивности и эффективности сельскохозяйственных предприятий // Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland. 2003. No. 49. 39 p.

Статья поступила в редакцию 13 января 2019 года

COMPARATIVE EVALUATION OF COMPUTER EQUIPMENT EFFICIENCY IN THE DEPARTMENTS OF INDUSTRIAL ENTERPRISE

R.A. Uchaykin, S.P. Orlov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper considers the task of assessing the effectiveness of computer equipment used in the design and design departments of a large engineering company. It is shown that the variety of tasks to be solved, the difference between computer configurations and departmental staff makes it difficult to identify functional links between the efficiency criteria and the characteristics of computing. It is proposed to use the analysis method of the operating environment - Data Envelopment Analysis, which allows to conduct a comparative analysis of heterogeneous production units and determine the directions of achieving the specified performance. The article proposes a system model of the company's department. The model takes into account the following parameters of units and computer equipment: the number of employees, the number, the item and performance of computers, the total cost of computer equipment, the specific amount of tasks performed in the department. An analysis of the mutual influence of different entrance and output parameters has been carried out. Non-performing units have been identified and the targets for their parameters are set to further improve efficiency. During the biennium, with the use of the Malmqvist index, progressive departments and departments in which the efficiency of computer technology decreased were identified. Graphs and diagrams of the units in the question are presented under different conditions. Conclusions on providing units with new computer equipment and reallocating resources have been drawn.*

Keywords: *system analysis, efficiency, use of computer equipment, Data Envelopment Analysis, Malmquist index.*

REFERENCES

1. Vasilev R.B., Kalianov G.N., Levochkina G.A. Upravlenie razvitiem informatsionnykh sistem [Information systems development management]. Moscow, INTUIT, 2016. 507 p. (In Russian).
2. Mosleh M., Ludlow P., Heydari B. Resource allocation through network architecture in systems of systems: A complex networks framework. *Proc. of the 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, Orlando, FL, USA. IEEE Xplore. 2016. Pp. 1–5.
3. Auad M., Borshch V.V., Lazarenko A.V., Minin Y.V. Optimization problems of the selection and distribution of resources in information systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, control, diagnostika*. 2014. No. 1. Pp. 43–46 (In Russian).
4. Didrikh V.E., Didrikh I.V., Gromov Y.Y., Ivanovskii M.A. The task of resource allocation in a network information system. *Vestnik Tambov. gos. tekhn. un-ta*. 2016. Vol. 22. no. 4. Pp. 541–549. (In Russian).

Roman A. Uchaykin, Postgraduate Student.
Sergey P. Orlov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

5. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* The problem of computer equipment distribution using at the machine-building enterprise. *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki.* 2019. Vol. 4(69). Pp. 84–98. (In Russian).
6. *Uchaykin R.A., Orlov S.P.* Automated management of the use of computer technology at a machine-building enterprise. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiiakh. Proc. Int. Sci. conf.* Saint-Petersburg. 2019. Vol. 12(2). Pp. 81–87. (In Russian).
7. *Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.* Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software. 2nd Edn. Springer Science + Business Media, 2007. 492 p.
8. *Cooper W.W., Seiford L.M., Zhu J.* Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis. Springer, Boston, MA, 2011, pp. 1–39.
9. *Piskunov A.A., Ivaniuk I.I., Lychev A.V., Krivonozhko V.E.* Using the ASF methodology to assess the effectiveness of budget spending on public administration in the constituent entities of the Russian Federation. *Vestnik AKSOR.* 2009. Vol. 2. Pp. 28–36. (In Russian).
10. *Nechaev D.A., Orlov S.P.* Comprehensive assessment and classification of objects of water supply in the region. *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki.* 2013. Vol. 1(37). Pp. 14–21. (In Russian).
11. *Rybakova I.A., Orlov S.P.* Comparative analysis the efficiency of CRM for companies. *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhn. nauki.* 2018. Vol. 1(57). Pp. 31–37. (In Russian).
12. AIDA64. URL: <https://www.aida64.com/products/aida64-engineer> (accessed 08.12.2019).
13. 3DMark. URL: <https://benchmarks.ul.com/3dmark> (accessed 23.11.2019)
14. Cinebench. URL: <https://www.maxon.net/en-gb/products/cinebench-r20-overview> (accessed 01.12.2019).
15. PIM-DEA. URL: <http://www.deasoftware.co.uk/> (accessed 21.10.2019)
16. *Lissitsa A., Babiéceva T.* Theoretical foundations of the analysis of the productivity and efficiency of enterprises. Discussion paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. Halle (Saale), Deutschland. 2003. No. 49. 39 p. (In Russian).

Электротехника

УДК 621.316

ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ STATCOM ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПОИСКА ЛЕТУЧЕЙ МЫШИ

Р.А. Алехин, Ю.П. Кубарьков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Современные энергосистемы характеризуются динамичным изменением всех входящих в них компонентов: появляется большое количество крупных промышленных потребителей, производятся регулярные работы по вводу в работу нового или модернизации старого израсходовавшего свой ресурс оборудования, разрабатываются новые концепции по созданию и управлению энергосистемами. Все эти действия приводят к значительному усложнению топологии энергосистем, а также к повышению трудоемкости проектирования новых и диспетчеризации имеющихся систем. При увеличении нагрузок увеличиваются системные потери и значительно ухудшается профиль напряжения во всех узлах энергосистемы. Электрическая энергия постоянно рассеивается в электрических сетях на уровнях передачи и распределения. Потери мощности в распределительной сети из-за более низкого уровня напряжения и более высокого отношения активного сопротивления к реактивному по сравнению с уровнем магистральных сетей являются более значительными. Кроме того, потери мощности вынуждают электрические станции придерживаться большей генерации активной и реактивной мощностей, что приводит к повышенному использованию топлива и росту тарифов для конечного потребителя. В сложившейся ситуации использование традиционных методов для нахождения оптимальных условий работы энергосистем становится неэффективным. Наибольшую популярность для решения подобных проблем приобрели эвристические, а затем и метаэвристические оптимизационные методы, способные найти решение, близкое к глобальному оптимуму. В статье представлено решение проблемы оптимизации уровней напряжения в энергосистеме с помощью метода поиска летучей мыши и выполнено сравнение полученных результатов с методом оптимизации роя частиц. Рассматриваемый метод показал более высокие оптимизационные качества, что свидетельствует о его пригодности для решения подобных задач.*

Ключевые слова: *оптимизация, напряжение, реактивная мощность, оптимизация роем частиц, метод поиска летучей мыши.*

Алехин Роман Александрович, аспирант.

Кубарьков Юрий Петрович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электрические станции».

Введение

Энергосистемы по всему миру являются весьма динамично развивающимися техническими комплексами. С ростом населения, а также регулярным появлением все большего количества производств с высоким потреблением электроэнергии увеличивается и суммарная нагрузка, а структура распределительной системы становится все более сложной. К тому же регулярно появляются новые технологии, улучшающие различные показатели электроэнергии. Так, по всему миру наметилась тенденция к переходу от использования централизованных электрических станций к созданию небольших сетей с собственной генерацией небольшой мощности, как правило, использующих для выработки возобновляемых источников энергии (ветер, солнечное излучение, термальные источники и др.) Подобные комплексы объединены в термин «распределенная генерация». Однако эксплуатация и модернизация таких динамичных систем ставит перед сетевыми компаниями, проектными, а также исследовательскими организациями новые задачи. При увеличении нагрузок увеличиваются системные потери, значительно ухудшается профиль напряжения во всех узлах энергосистемы. Электрическая энергия постоянно рассеивается в электрических сетях на уровнях передачи и распределения. Потери мощности в распределительной сети из-за более низкого уровня напряжения и более высокого отношения R/X по сравнению с уровнем передачи являются более значительными. Кроме того, потери мощности вынуждают электрические станции придерживаться большей генерации активной и реактивной мощностей, что, в свою очередь, приводит к повышенному использованию ископаемого топлива, а также повышению тарифов на электроэнергию для конечного потребителя. Опрос показывает, что до 70 % общих потерь мощности в энергосистеме относятся к распределительной сети [1–2]. Потери активной мощности, связанные с распределительной сетью, в основном связаны с электрическим сопротивлением и обычно привлекают больше внимания со стороны распределительных сетевых компаний.

Целью данной статьи является применение оптимизационного метода поиска летучей мыши для задачи снижения отклонений уровней напряжения от заданных значений во всех узлах энергосистемы, а также его сравнение с методом оптимизации роя частиц.

Устройства компенсации реактивной мощности

К способам борьбы с потерями электрической энергии и отклонениями уровней напряжений в электрических сетях относятся [3]:

- изменение коэффициентов трансформации у трансформаторов. В зависимости от модели трансформатора возможно регулирование как под нагрузкой, так и с отключением нагрузки на момент переключений;
- изменение тока возбуждения генераторов на электрических станциях;
- применение различных компенсирующих устройств, приводящих к перераспределению потоков реактивной мощности.

Традиционно размещение устройств компенсации реактивной мощности является основным методом снижения потерь в распределительных системах [4]. Возможны два типа установки подобных устройств: последовательная и поперечная. Они изменяют параметры системы так, чтобы обеспечить высокую компенсацию реактивной мощности.

Для оптимизации пропускной способности линии передачи используется шунтирующая и последовательная компенсация. Используя контроллеры

FACTS, можно управлять такими переменными, как величина напряжения и фазовый угол на выбранном фрагменте сети, импеданс линии. Есть пять хорошо известных устройств FACTS, используемых энергетиками для этой цели. К таким устройствам относятся статический вариатор (SVC), статический синхронный компенсатор (STATCOM), тиристорный конденсатор с последовательным управлением (TCSC), статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC) и унифицированный контроллер потока мощности (UPFC). Стабилизация напряжения происходит, когда система загружена выше предельной максимальной нагрузки. В настоящее время для анализа этой проблемы предложены различные методы. Большинство из этих методов основаны на идентификации системного равновесия, когда соответствующие якобианы становятся единичными. Эти точки равновесия обычно называют точками неустойчивого напряжения и могут быть математически связаны с разветвлением опорного узла. Точки неустойчивого напряжения также известны как точки максимальной нагрузки.

Производство и передача электроэнергии – сложный процесс, требующий совместной работы многих компонентов энергосистемы для максимизации производительности. Одним из компонентов, составляющих основную часть, является реактивная мощность в системе. В большинстве случаев требуется стабилизировать напряжение для передачи активной мощности по линиям. Нагрузки, такие как нагрузки двигателя и другие, требуют реактивной мощности для их работы. Чтобы повысить производительность систем электропитания переменного тока, необходимо эффективно управлять этой реактивной мощностью.

Есть два аспекта проблемы компенсации реактивной мощности: компенсация нагрузки и поддержка напряжения.

Компенсация нагрузки состоит из улучшения коэффициента мощности, балансировки активной мощности, потребляемой от источника питания, лучшего регулирования напряжения и т. д. При больших колебаниях нагрузки стабилизация напряжения состоит в уменьшении колебаний напряжения на данном участке линии передачи. Можно использовать два типа компенсации: последовательную и шунтирующую. При этом изменяются параметры системы и обеспечивается оптимальная компенсация. В последние годы были разработаны статические компенсаторы VAR, такие как тиристорный конденсатор с последовательным управлением (TCSC) и статические компенсаторы реактивной мощности STATCOM. Они вполне удовлетворительно выполняют работу по потреблению или генерации реактивной мощности с более быстрым откликом по времени и относятся к гибким системам передачи переменного тока (FACTS). Это позволяет увеличить передачу полезной мощности по линии передачи и значительно улучшить стабильность за счет регулировки параметров, управляющих энергосистемой.

TCSC является контроллером серии FACTS. Он может увеличить пропускную способность, уменьшить потери в системе, улучшить стабильность системы, улучшить профиль напряжения линий. Это лучшее устройство для контроля потока мощности в линии электропередачи. TCSC состоит из последовательного конденсатора, индуктора, тиристорного регулятора. Последовательный компенсирующий конденсатор соединен последовательно с линией передачи, а TCR подключен непосредственно параллельно с конденсатором.

Не требуется никаких сопряженных устройств, таких как высоковольтный трансформатор. TCR состоит из переменного индуктора и тиристоров [2, 14].

Схема TCSC приведена на рис. 1. Это устройство может быстро изменять реактивное сопротивление линии передачи и изменять поток энергии в линии передачи. Работа TCSC может быть объяснена с помощью анализа цепей. TCR (рис.2) – индуктивное реактивное сопротивление, контролируемое углом зажигания [6].

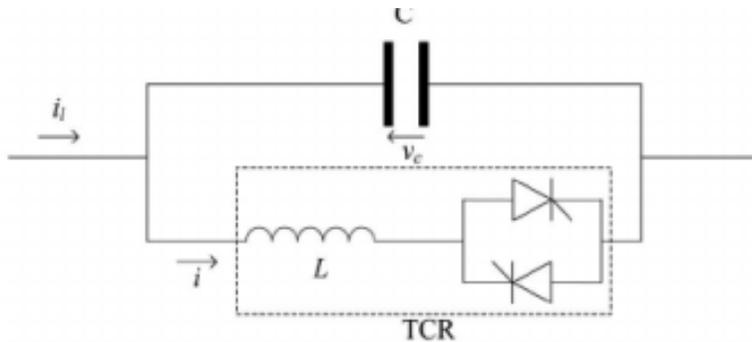


Рис. 1. Простая схема TCSC

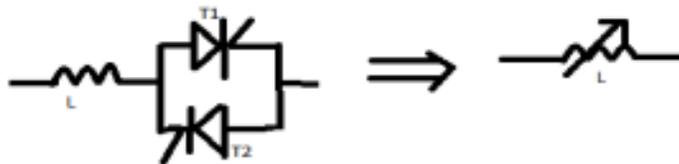


Рис. 2. Эквивалентная схема TCR

Статические синхронные компенсаторы (STATCOM)

STATCOM позволяет существенно увеличить пропускную способность активной мощности через линии электропередачи в установившихся режимах и значительно улучшить устойчивость энергосистемы путем регулировки таких параметров, как ток, напряжение, фазовый угол и полное сопротивление [6]. Эти устройства являются дополнением к традиционному управлению энергосистемой, но благодаря быстрдействию контроллеров возможно использование устройств STATCOM для повышения стабильности энергосистемы за счет улучшенного демпфирования колебаний мощности. Достигается это путем регулирования перетоков полной мощности и уменьшения низкочастотных колебаний в сети. С точки зрения динамической устойчивости энергосистемы STATCOM обеспечивает лучшие демпфирующие характеристики, чем другие устройства, входящие в концепцию FACTS, статические тиристорные компенсаторы [7–8].

За счет своих конструктивных особенностей такие устройства используются для регулирования перетоков реактивной мощности в системе независимо от других параметров системы. STATCOM не имеет собственных источников генерации активной мощности на стороне постоянного тока и не может обмениваться активной мощностью с системой переменного тока.

STATCOM включает в себя трехфазный инвертор, основанный на биполярных транзисторах с изолированным затвором, конденсатор постоянного тока,

который обеспечивает напряжение постоянного тока для инвертора, связующий реактор, который связывает выход инвертора со стороной источника переменного тока, а также трансформатор связи устройства с сетью высокого напряжения. Состав STATCOM представлен на рис. 3. На стороне конденсатора трехфазное напряжение генерируется инвертором, а фаза синхронизируется с источником питания со стороны переменного тока [9–11].

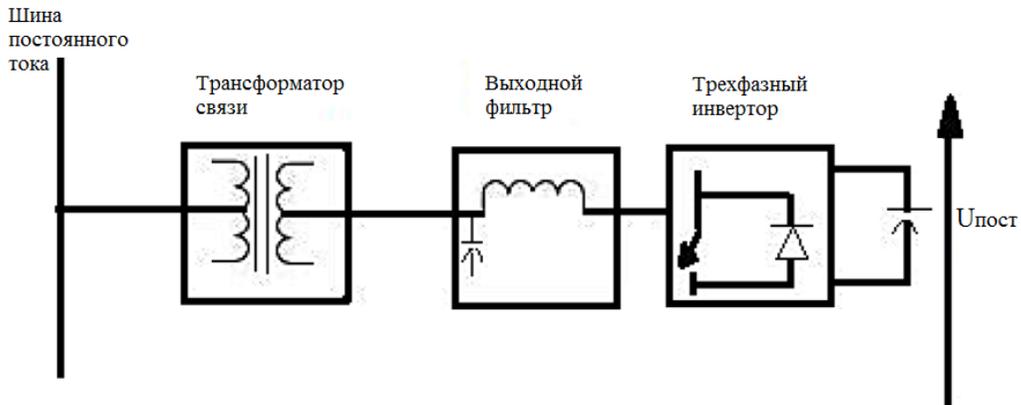


Рис. 3. Устройство STATCOM

В случае отставания фазы напряжения в сети от фазы на устройстве STATCOM представляется для энергосистемы в виде емкостного элемента и вырабатывает реактивную мощность. В обратном случае STATCOM становится индуктивным элементом и происходит потребление реактивной мощности из сети.

Математическая модель

Задача поиска оптимальных уровней напряжений в узлах энергосистемы с распределенной генерацией подразумевает использование для этих целей устройств компенсации реактивной мощности. Для правильного оценивания эффективности выполняемых в ходе экспериментов действий необходим выбор корректных математических функций. Для поставленной задачи невозможен выбор только одной функции, так как изменение и контроль только за одним параметром – уровнем напряжения в энергосистеме – приводит к значительным изменениям других параметров энергосистемы, которые могут поставить под сомнение эффективность применяемых действий. С этой целью в работе рассматриваются две целевые функции.

Целевая функция, учитывающая суммарные отклонения уровней напряжения от заданных значений:

$$F_1(x) = \sum_{j=1}^M |U_j - U_{j\text{зад}}| \quad (1)$$

целевая функция, учитывающая суммарные перетоки активной мощности по всем линиям в энергосистеме:

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^N R_i \cdot |I_i|^2 \quad (2)$$

где i и j – номера линий и узлов в энергосистеме соответственно;

M и N – общее количество узлов и линий электропередач в энергосистеме соответственно;

U_j и $U_{j\text{ зад}}$ – напряжение в узле и заданное напряжение в соответствующем узле;

R_i и I_i – активное сопротивление и ток в соответствующей линии электропередач.

Оценка эффективности выполнения операций оптимизации выполняется с помощью минимизации фитнес-функции (функции пригодности), в которую указанные выше целевые функции включены с различными весовыми коэффициентами. Фитнес-функция позволяет объединить в простом и пригодном для анализа уравнении все множество переменных многомерного пространства решения, коим является модель энергосистемы. Фитнес-функция представлена в формуле [12]

$$f_{\min} = W_1 F_1 + \frac{W_2}{F_2^2}, \quad (3)$$

где W_1, W_2 – весовые коэффициенты:

$$W_1 + W_2 = 1. \quad (4)$$

Надлежащее выполнение расчетов невозможно без учета различных режимных ограничений. В силу наличия в энергосистемах большого количества оборудования различного назначения и конфигурации все оно имеет свои эксплуатационные пределы, при выходе за которые возможно быстрое сокращение сроков службы устройств, их поломка и возникновение аварийной ситуации.

Наиболее значимые ограничения представлены в формулах (5) – (9):

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max}; \quad (5)$$

$$S_i \leq S_{\max}; \quad (6)$$

$$P_{j\min} \leq P_j \leq P_{j\max}; \quad (7)$$

$$Q_j \leq Q_j \leq Q_{j\max}; \quad (8)$$

$$T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max}; \quad (9)$$

где U_j – напряжение в узле j ;

S_i – переток полной мощности по линии электропередачи i ;

P_j, Q_j – выработка активной и реактивной мощности в узле j соответственно;

T_i – номер отпайки РПН/ЛПБВ трансформатора или автотрансформатора i .

Метод поиска летучей мыши

В связи со значительным ростом производительности электронно-вычислительных машин, обусловленного развитием микропроцессорных устройств, у ученых по всему миру появилась возможность выполнять моделирование сложных систем большой размерности, затрачивая гораздо меньше времени на проведение расчетов. Общий алгоритм оптимизационного метода применительно к поставленной задаче следующий.

На схеме (рис. 4): f_i и β – частота издаваемого летучей мышью i звука и произвольное число из интервала (0; 1) соответственно;

ΔQ_i , Q_i , Q_{Gbest_i} – величина изменения, текущий объем и лучшее значение компенсации реактивной мощности в узле i соответственно;

$rand$ и r_i – произвольное число от 0 до 1 и частота импульсов летучей мыши i соответственно;

A_i^k , \bar{A} и $rand_1$ – громкость летучей мыши i на итерации k , средняя громкость всех летучих мышей и произвольное число в диапазоне (-1; 1) соответственно;

α и γ – константы [13–18].

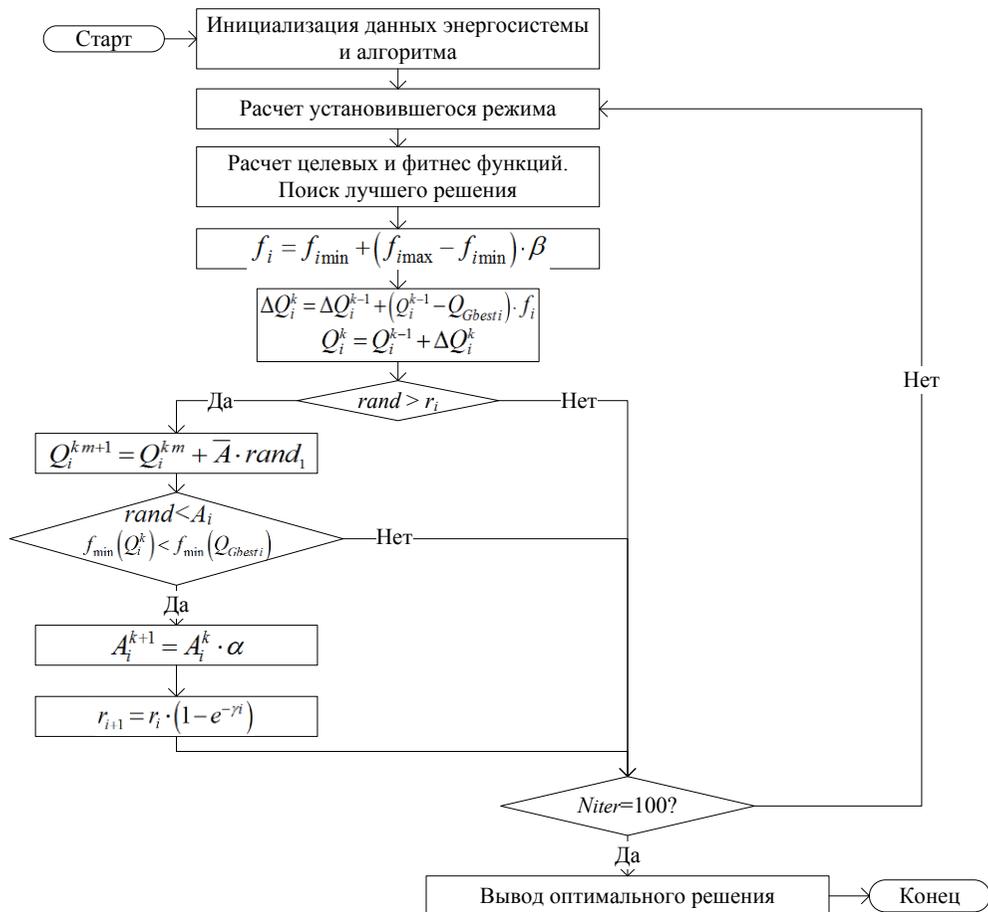


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска летучей мыши

Все это способствовало бурному развитию специального раздела математики – оптимизации и появлению большого количества эвристических и метаэвристических оптимизационных методов.

Данные методы способны не вполне точно, но с достаточной степенью приближения находить решение широкого круга задач, в том числе и в сфере электроэнергетики. В основе многих оптимизационных методов лежат явления и процессы, происходящие в природе. К их числу относится и метод поиска летучей мыши.

Концепция метода поиска летучей мыши заключается в применении отличительных качеств данного вида животных – использовании эхолокации при поиске пищи и ориентации в пространстве. Во время перемещения в пространстве мыши, обнаружив интересные их места, переходят к более детальному изучению небольшой области. Для выполнения таких действий летучие мыши в процессе поиска способны изменять частоту и громкость звука, а также частоту испускаемых импульсов.

Исследуемая энергосистема

Для выполнения оценки эффективности метода поиска летучей мыши для задачи сокращения отклонений уровней напряжения в узлах энергосистемы от заданных значений использовалась модель энергосистемы, представленная на рис. 5. Данная модель включает в себя 50 узлов классов напряжения 220/110/35/10/6 кВ и содержит как потребителей, так и генерирующее оборудование.

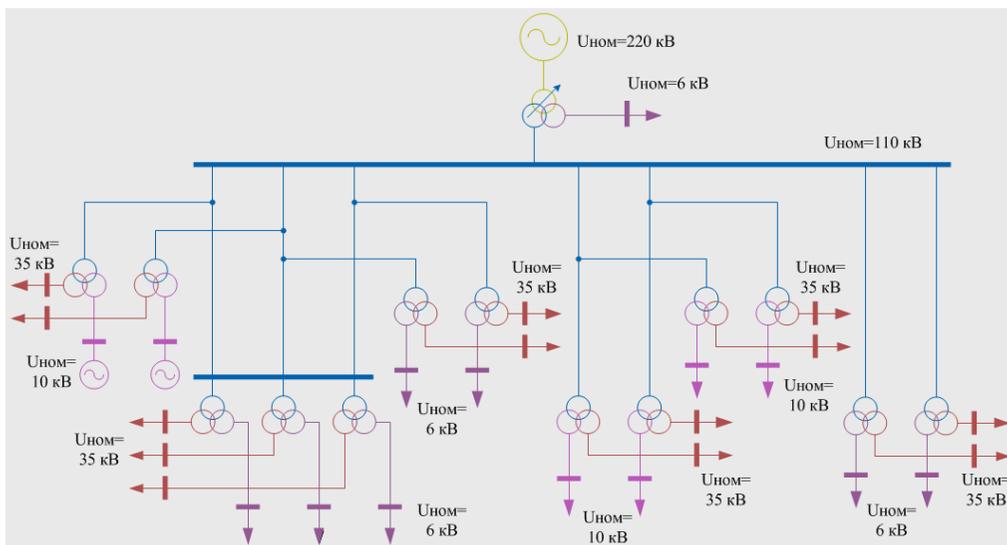


Рис. 5. Схема исследуемой энергосистемы

Для компенсации реактивной мощности в энергосистеме используются устройства СТАТКОМ.

Результаты расчетов

Для выполнения сравнительного анализа рассчитывались три режима:

- 1) расчет без устройств компенсации реактивной мощности в сети;
- 2) расчет с помощью алгоритма поиска летучей мыши;
- 3) расчет с помощью метода оптимизации роя частиц.

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 5–10.

По полученным графикам видно, что после выполнения всех итераций фитнес-функция алгоритма поиска летучей мыши имеет меньшее значение по сравнению с методом роя частиц. Значения напряжений в большинстве узлов энергосистемы по методу поиска летучей мыши отклоняются от заданных значений на меньшую величину по сравнению с другим рассматриваемым методом.

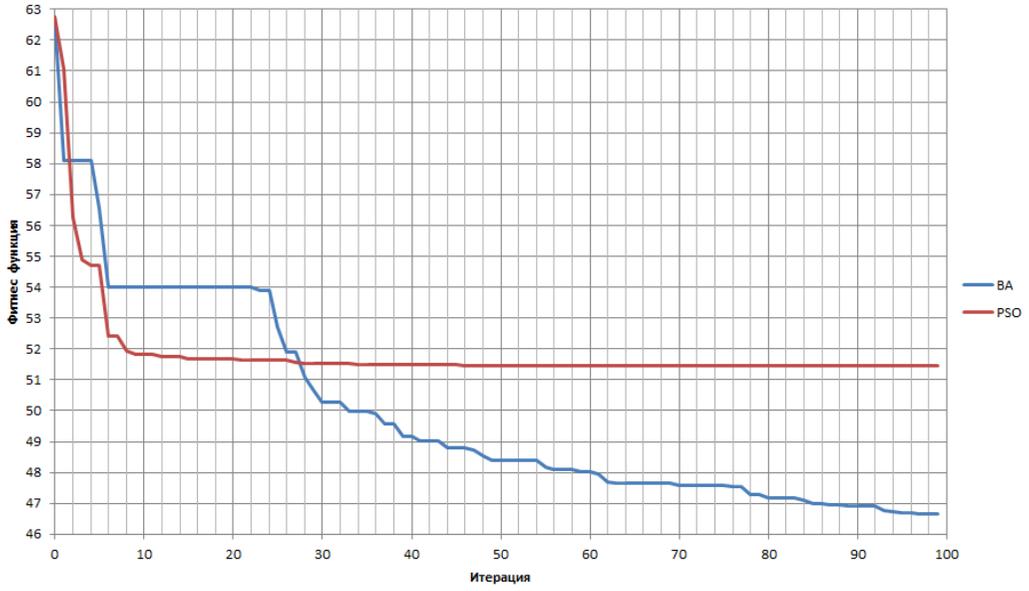


Рис. 6. Фитнес-функции оптимизационных методов

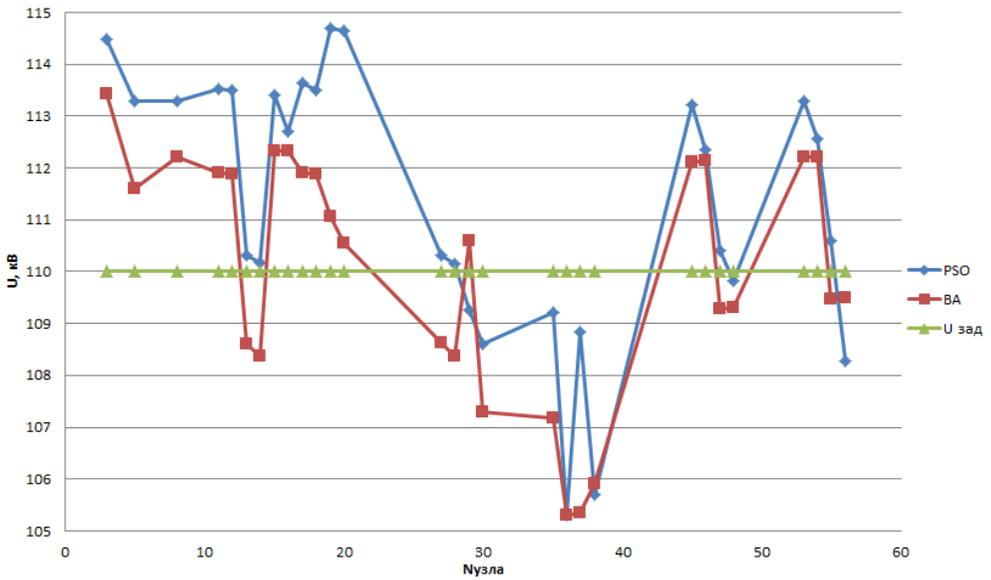


Рис. 7. Отклонения уровней напряжений в узлах 110 кВ

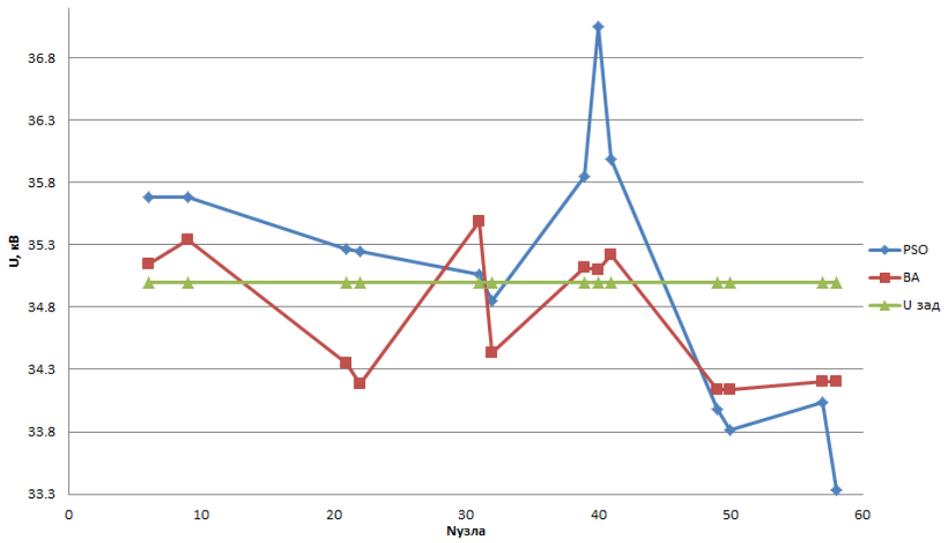


Рис. 8. Отклонения уровней напряжений в узлах 35 кВ

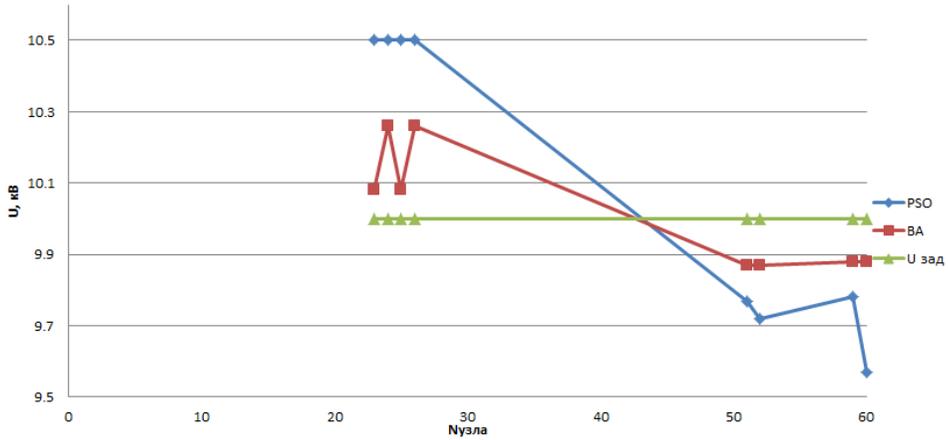


Рис. 9. Отклонения уровней напряжений в узлах 10 кВ

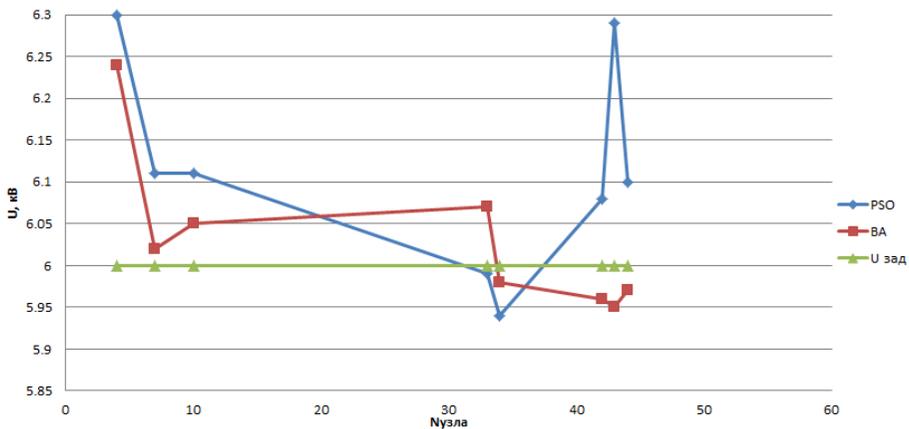


Рис. 10. Отклонения уровней напряжений в узлах 6 кВ

Заклучение

Представленные результаты подтверждают, что алгоритм поиска летучей мыши применим для задач стабилизации уровней напряжения в узлах энергосистемы при заданных значениях мощности в узлах нагрузок, а также для оптимального распределения реактивной мощности в энергосистеме. В сравнении с методом оптимизации роя частиц, являющегося одним из наиболее популярных в данной области, рассматриваемый метод показывает лучшие оптимизационные качества. Применение данного метода позволит увеличить пропускную способность линий электропередач, а также сократить потери электроэнергии при её передаче. Полученные данные создают задел для дальнейшего использования алгоритма поиска летучей мыши для более широкого круга электроэнергетических задач, а также его дальнейшей модернизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sarfi R.J., Salama M.M.A., Chikhani A.Y.* A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration. *Electr. Power Syst. Res.*, 1994. Vol. 4, no. 1. Pp. 61–70.
2. *Gallejo R.A., Monticelli A., Romero R.* Optimal capacitor placement in radial distribution networks. *IEEE Trans. Power Sys.*, 2001. Vol. 16, no. 4. Pp. 630–637.
3. *Кудрин Б.И.* Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1995. 446 с.
4. *Natesan R. and Radman G.* Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on Voltage Stability, *Proceedings of the system theory thirty – Sixth southeastern symposium*, 2004, pp. 546–550.
5. *Talebi N., Ehsan M., Bathaee S.M.T.* Effects of SVC and TCSC Control Strategies on Static Voltage Collapse Phenomena, *IEEE Proceedings, Southeast Con*, Mar 2004, pp. 161–168.
6. *Kazemi A., Vahidinasab V. and Mosallanejad A.* Study of STATCOM and UPFC Controllers for Voltage Stability Evaluated by Saddle – Node Bifurcation Analysis, *First International Power and Energy Conference PECon/IEEE, Putrajaya, Malaysia*, November 28–29, 2006, pp. 191–195.
7. *Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan and Kwang Y. Lee.* Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, Dalian China*, 2005, pp. 1–6.
8. *Cañizares A., Cavallo C., Pozzi M., and Corsi S.* Comparing Secondary Voltage Regulation and Shunt Compensation for Improving Voltage Stability and Transfer Capability in the Italian Power System. *Electric Power Systems Research*, Vol. 73, No. 1, pp 67–76, January, 2005.
9. *Chang C.F.* Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm. *IEEE Trans. Power Sys.*, 2008. Vol. 23 no. 1. Pp. 1747–1755.
10. *Dehini R., Chellali B., Bassou C.* Simulation of Distribution Static Compensator (DSTATCOM) to Improve Power Quality. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2012. Vol. 38, no. 1. Pp. 3051–3058.
11. *Tyll H.K., Schettler F.* Power System Problems solved by FACTS Devices. *Power Systems Conference and Exposition*, 2009. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–5.
12. *Perron M., Ghahremani E., Heniche A., Kamwa I., Lafond C., Racine M., Akremi H., Cadieux P., Lebeau S., Landry S.* Wide-area voltage control system of flexible AC transmission system devices to prevent voltage collapse. *ET Generation, Transmission & Distribution*, 2017. Vol. 11, no. 18. Pp. 4556–4564.
13. *Eltamaly A.M., Elghaffar A.N.* Load Flow Analysis by Gauss-Seidel Method; A Survey. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, 2017. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–8.
14. *Urmila B., Mohini, Kiran R., Anju G.* Transient stability enhancement of multi machine system using static VAR compensator. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2015. Vol. 3, no. 3. Pp. 1068–1076.
15. *Fandi G., Muller Z., Straka L., Svec J.* FACTS devices influence on power losses in transmission systems. *15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 29–33.
16. *Okeke T.U., Zaher R.G.* Flexible AC Transmission Systems (FACTS). *International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, 2013. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–4.

17. *Chebbo A.M., Irving M.R.* Combined Active and Reactive Dispatch – Part 1: Problem Formulation and Solution Algorithm. IEEE Proc. Generat. Transm. Distribut., 2002. Vol. 142, no. 4, Pp. 393–400.
18. *Yang X.S.* BAT Algorithm for Multiobjective Optimization. Int. J. Bio-Inspired Comput., 2011. Vol. 3, No. 5, Pp. 267–274.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2019 г.

APPLICATION OF STATCOM FOR VOLTAGE REGULATION IN POWER SYSTEMS USING THE BAT SEARCH ALGORITHM

R.A. Alehin, Y.P. Kubarkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *Modern energy systems are characterized by a dynamic change in all their constituent components: a large number of industrial consumers appear, regular work is done to commission new or modernize old equipment, and new concepts for creating and managing energy systems are being developed. With increasing loads, system losses increase, and the voltage profile in all nodes of the power system becomes much worse. Electrical energy is constantly lost in electrical networks at transmission and distribution levels. Power losses in the distribution network due to a lower voltage level and a higher ratio of active resistance to reactive compared to the level of transmission networks are more significant. In addition, power losses force electric plants to generate more active and reactive power, which leads to increased fuel use and higher tariffs for the end user. In this situation, the use of traditional methods to find optimal operating conditions for energy systems becomes ineffective. Heuristic and then metaheuristic optimization methods that are able to find a solution close to the global optimum have gained the greatest popularity for solving such problems. The article presents a solution to the problem of optimizing voltage levels in the power system using the bat search algorithm and compares the results obtained with the particle swarm optimization algorithm. This method showed higher optimization qualities, which indicates its applicability for solving such problems.*

Keywords: *optimization, voltage, reactive power, particle swarm optimization, bat search algorithm.*

REFERENCE

1. *Sarfi R.J., Salama M.M.A., Chikhani A.Y.* A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration. Electr. Power Syst. Res., 1994. Vol. 4, no. 1. Pp. 61–70.
2. *Gallego R.A., Monticelli A., Romero R.* Optimal capacitor placement in radial distribution networks. IEEE Trans. Power Sys., 2001. Vol. 16, no. 4. Pp. 630–637.
3. *Kudrin B.I.* Power supply of industrial enterprises: Textbook for high schools. M.: Energoatomizdat, 1995. 446 c.
4. *Natesan R. and Radman G.* Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on Voltage Stability, Proceedings of the system theory thirty – Sixth southeastern symposium, 2004, pp. 546–550.
5. *Talebi N., Ehsan M., Bathaee S.M.T.* Effects of SVC and TCSC Control Strategies on Static Voltage Collapse Phenomena, IEEE Proceedings, Southeast Con, Mar 2004, pp. 161–168.

*Roman A. Alekhin, Postgraduate student.
Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

6. *Kazemi V.* Vahidinasab and A. Mosallanejad, Study of STATCOM and UPFC Controllers for Voltage Stability Evaluated by Saddle – Node Bifurcation Analysis, First International Power and Energy Conference PECon/IEEE, Putrajaya, Malaysia, November 28–29, 2006, pp. 191–195.
7. *Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan and Kwang Y. Lee.* Static Voltage Stability Margin Enhancement Using STATCOM, TCSC and SSSC, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, Dalian China, 2005, pp. 1–6.
8. *Cañizares C. Cavallo, Pozzi M., and Corsi S.* Comparing Secondary Voltage Regulation and Shunt Compensation for Improving Voltage Stability and Transfer Capability in the Italian Power System, Electric Power Systems Research, Vol. 73, No. 1, pp. 67–76, January, 2005.
9. *Chang C.F.* Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by AntColony Search Algorithm. IEEE Trans. Power Sys, 2008. Vol. 23 no. 1. Pp. 1747–1755.
10. *Dehini R., Chellali B., Bassou C.* Simulation of Distribution Static Compensator (DSTATCOM) to Improve Power Quality. Arabian Journal for Science and Engineering, 2012. Vol. 38, no. 1. Pp. 3051–3058.
11. *Tyll H.K., Schettler F.* Power System Problems solved by FACTS Devices. Power Systems Conference and Exposition, 2009. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009. Vol. 1, no 1. Pp. 1–5.
12. *Perron M., Ghahremani E., Heniche A., Kamwa I., Lafond C., Racine M., Akremi H., Cadieux P., Lebeau S., Landry S.* Wide-area voltage control system of flexible AC transmission system devices to prevent voltage collapse. ET Generation, Transmission & Distribution, 2017. Vol. 11, no. 18. Pp. 4556–4564.
13. *Eltamaly A.M., Elghaffar A.N.* Load Flow Analysis by Gauss-Seidel Method; A Survey. International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology, 2017. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–8.
14. *Urmila B., Mohini, Kiran R., Anju G.* Transient stability enhancement of multi machine system using static VAR compensator. International Journal of Engineering Research and General Science, 2015. Vol. 3, no. 3. Pp. 1068–1076.
15. *Fandi G., Muller Z., Straka L., Svec J.* FACTS devices influence on power losses in transmission systems. 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 29–33.
16. *Okeke T.U., Zaher R.G.* Flexible AC Transmission Systems (FACTS). International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE), 2013. Vol. 1, no. 1. Pp. 1–4.
17. *Chebbo A.M., Irving M.R.* Combined Active and Reactive Dispatch – Part 1: Problem Formulation and Solution Algorithm. IEEE Proc. Generat. Transm. Distribut., 2002. Vol. 142, no. 4, Pp. 393–400.
18. *Yang X.S.* BAT Algorithm for Multiobjective Optimization. Int. J. Bio-Inspired Comput., 2011. Vol. 3, No. 5, Pp. 267–274.

УДК 621.646.986

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАПОРНЫХ УСТРОЙСТВАХ***А.А. Базаров, Н.В. Бондарева**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрен комплекс вопросов по компьютерному моделированию процессов деформации в запорных устройствах (задвижках) при снижении температуры. Некоторые типы задвижек, используемых для перекрытия потоков жидкости, подвержены заклиниванию. Эта проблема касается задвижек с цельным жестким клином. Часто это проявляется при снижении температуры до отрицательных значений. Электроприводы задвижек имеют достаточную мощность, что в совокупности с наличием редукторов при попытке открытия создает усилие, приводящее иногда к обрыву штока задвижки. Целью работы является определение влияния геометрических и физических параметров в задвижке на формирование деформаций и термонапряжений, приводящих к заклиниванию. Для выяснения причины заклинивания был произведен анализ различных вариантов возникновения деформаций элементов конструкции, связанных с технологией обработки прилегающих поверхностей клина и седловины, применением различных материалов, выполнены расчеты процессов деформации для некоторых простых конструкций. Математическое моделирование произведено с помощью метода конечных элементов. Ввиду медленного изменения температуры окружающей среды для расчетов использованы стационарные трехмерные модели. Изменение температуры задано в задаче в виде фиксированного перепада. Особенности конструкции задвижек с жестким клином требуют тщательной механической обработки, чтобы обеспечить плотное прилегание и исключить утечки. Из-за сложности доступа во внутренние полости задвижки для обработки предусмотрена разборная конструкция, что позволяет добиться высокого качества поверхностей и исключить заклинивания по этой причине. Применение сталей разных марок и возможность закалки поверхностей во время механической обработки приводят к отличию физических свойств, в частности коэффициента термического расширения. Однако, как показали расчеты, при небольшой толщине этих деталей и глубине закалки влияние этого фактора очень незначительно. Еще одной причиной различия величин деформаций является отличие удлинения стержня и цилиндрической оболочки. В рассматриваемом диапазоне температур для материалов с низкими коэффициентами теплового расширения разница в изменении геометрических размеров оказалась очень малой и сопоставимой с погрешностью вычислений. Исследование влияния геометрической формы на величину относительных деформаций элементов задвижки показало, что применение в конструкции цилиндрических оболочек и сплошных цилиндров не приводит к появлению термонапряжений. Даже форма клина не влияет на величину деформаций. Однако изготовление вертикальной части корпуса в виде конической

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-06-00212).

Базаров Александр Александрович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Бондарева Наталья Викторовна, аспирантка.

оболочки приводит к появлению значительных отклонений в величине деформаций сопряженных поверхностей. В реальных задвижках корпус имеет более сложную форму, но соотношение размеров соответствует рассмотренной упрощенной модели. Вывод: для исключения заклинивания необходимо выполнять конструкцию симметричной. Так как такое решение является более материалоемким, то требуется оснащать задвижки системами подогрева для выравнивания деформаций.

Ключевые слова: задвижка с жестким клином, заклинивание, тепловые деформации, метод конечных элементов.

Введение

Запорная арматура, установленная на трубопроводах, управляет потоком перекачиваемых жидкостей и газов. Один из видов запорных элементов – устройство в форме клина – называется клиновой задвижкой, которая используется исключительно как запирающая конструкция, но не применяется для регулирования потока, поскольку имеет только два положения «открыто» и «закрыто».

Самым известным и самым надежным типом запорной арматуры считаются клиновые задвижки. Сфера их применения – трубопроводы с различными рабочими средами, которые не требуют точной регулировки потока.

В таких задвижках контактные поверхности корпуса располагаются под небольшим углом наклона друг к другу, а затвор является клином, который в закрытом положении плотно входит между ними. Тип клина зависит от особенностей эксплуатации.

Существует несколько видов стальных клиновых задвижек [1]. В жестких задвижках клин выполнен цельнолитым, что позволяет обеспечить хорошую герметичность. Однако при значительном отклонении температуры окружающей среды от начального значения возможно заклинивание [2]. Для решения этой проблемы созданы задвижки с составным двухдисковым запирающим элементом. Дополнительно причинами заклинивания являются коррозия, износ уплотняющих поверхностей.

На трубопроводах, где температура рабочей среды изменяется, рекомендуется применять задвижки с прорезиненным клином. Стоимость их невысока, а надежность проверена временем: такой тип используется очень давно и зарекомендовал себя как качественный. Их преимущество перед металлическими задвижками – независимость от температурных режимов, что позволяет избежать заклинивания. Проблемы с использованием таких задвижек связаны с высокими значениями температуры, давления или химической агрессивностью среды к материалу уплотнения.

Несмотря на достоинства конструкций с составным или обрешиненным клином задвижки с жестким клином находятся в эксплуатации.

Жесткий клин обеспечивает надежную герметичность запорного органа, но для этого требуется повышенная точность обработки для совпадения угла клина с углом между седлами корпуса [2, 3].

В качестве примера на рис. 1 представлена упрощенная конструкция задвижки с жестким клином. Уплотнительные поверхности наплавлены высоколегированной сталью, что позволяет их длительно эксплуатировать с заданной герметичностью. Корпус задвижки выполнен из стали 25Л, 35Л, а наплавка на клин и кольцо в корпусе – из стали 07Х25НЗ, 13Х25Е.

Для обеспечения плотного прилегания кроме высокого качества обработки

поверхностей требуется создание значительного усилия. Мощность двигателя привода задвижки изменяется в пределах от 0,025 кВт при значении условного диаметра $D=50$ мм до 7,5 кВт при $D=1200$ мм. Время открытия задвижки составляет от 0,8 до 5 минут. Большое время открывания обусловлено наличием редуктора, понижающего скорость вращения и увеличивающего момент. Усилия, создаваемые при подъеме клина, столь велики, что при заклинивании могут привести к обрыву штока (шпинделя) [4]. Дополнительной причиной обрыва является большой пусковой момент.

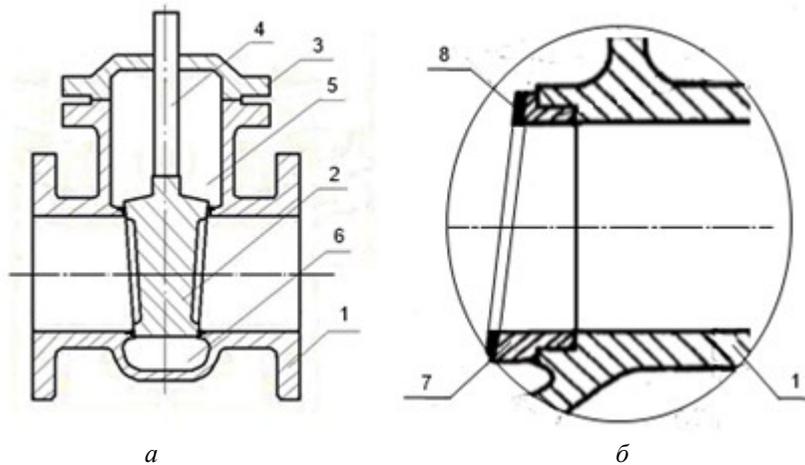


Рис. 1. Задвижка в разрезе (а) и седло (б):
 1 – корпус; 2 – клин; 3 – крышка; 4 – шток; 5 – полость под крышкой;
 6 – нижняя полость; 7 – кольцо (седло); 8 – наплавка на кольце

В процессе термообработки поверхностные слои стальных изделий изменяют свойства [5, 6]. Например, коэффициент линейного расширения стали для области, содержащей аустенит, может быть в два раза больше, чем в области, содержащей мартенсит. Процессы закалки могут происходить при механической обработке из-за нагрева поверхностей клина и седловины задвижки. В дальнейшем температурные колебания корпуса задвижки могут сопровождаться различными деформациями составляющих элементов – корпуса и клина. Конечно, данное явление не может привести к значительной разнице в величине деформаций, так как толщина закаленного слоя невелика, следовательно, не является значимой причиной заклинивания. Тем не менее следует провести более детальное исследование этого фактора.

В работе [6] автор приводит выражение, отражающее корреляцию между тепловыми и упругими характеристиками твердых тел. Взаимосвязь между такими параметрами, как коэффициент линейного температурного расширения α и модуль упругости E , проиллюстрирована на примере медного листа, полученного с помощью прокатки. Для листов, прошедших деформацию с разной степенью обжатия, полученные коэффициенты теплового расширения отличаются в 7 раз.

Рассмотренные физические процессы сказываются на деформациях в задвижке и могут служить причиной заклинивания [7]. Целью работы является исследование конструкции, выявление основных причин и формулировка рекомендаций по решению проблемы заклинивания задвижек с жестким клином.

Формулировка задачи

Деформации корпуса и составных частей задвижки при изменении температуры происходят в силу различия физических свойств и геометрической несимметрии непропорционально.

Проблемам надежной работы задвижек и, в частности, заклинивания посвящено немало работ [8–13], где рассмотрены вопросы совершенствования расчетных методик [8, 9], анализа причин разрушения [10], моделирования процессов деформаций [11, 12] и улучшения эксплуатационных характеристик [13]. Несмотря на выявленную связь некоторых типов задвижек с проблемой заклинивания не раскрыта основная причина этого явления.

Для объяснения данной проблемы в работе проведен анализ некоторых процессов деформации задвижек: моделирование процессов деформации в симметричной конструкции для исследования физических свойств при использовании разных материалов в конструкции задвижки; исследование влияния структуры металлов седловины и клина после термообработки на деформации и напряжения; исследование влияния формы корпуса на величину деформации и напряжений.

Для решения поставленных задач была разработана математическая модель процесса упругой деформации. Реализация задачи выполнена на базе программы Comsol.

Упругие деформации

В трехмерной области условия деформации в точке выражаются через компоненты u , v , w и их производные [14, 15]. Следуя предположению о малом смещении, компоненты нормальной деформации и компоненты деформации сдвига определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); & \varepsilon_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right).\end{aligned}$$

Симметричный тензор деформации ε состоит из нормальной и сдвиговой составляющих деформации:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}.$$

Для описания напряжений в материале используется тензорная форма представления:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}; \tau_{xy} = \tau_{yx}; \tau_{xz} = \tau_{zx}; \tau_{yz} = \tau_{zy}.$$

Тензор напряжений состоит из трех нормальных напряжений (σ_x , σ_y , σ_z)

и трех сдвиговых напряжений для симметричной задачи (τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz}). Соотношение напряжение-деформация для линейных условий имеет вид

$$\sigma = D\varepsilon,$$

где D – матрица упругости размером 6×6 , а компоненты напряжения и деформации описаны в векторной форме, причем шесть компонент напряжения и деформации в векторах-столбцах определены как

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{xz} \end{bmatrix}^T;$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z & \gamma_{xy} & \gamma_{yz} & \gamma_{xz} \end{bmatrix}^T.$$

Матрица упругости D определяется по-разному для изотропного, ортотропного и анизотропного материала. Для изотропных материалов матрица D выглядит следующим образом:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix},$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга), а ν – коэффициент Пуассона, который определяет сжатие в перпендикулярном направлении.

COMSOL Multiphysics основывает свою реализацию режимов применения структурной механики на слабой формулировке уравнений равновесия, выраженных в компонентах глобального напряжения.

Уравнения равновесия, выраженные в напряжениях, для трехмерной области формулируются следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0;$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = 0;$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0,$$

где F обозначает объемные силы (силы тела).

Эти соотношения при использовании компактной формы записываются в виде

$$-\nabla \cdot \sigma = \mathbf{F},$$

где σ – тензор напряжений.

Для рассматриваемой задачи используется статический анализ, поэтому время и динамические свойства сред не учитываются. Подстановка отношения напряжение-деформация и отношения деформация-смещение в уравнение статического равновесия приводит к уравнению равновесия Навье, выраженному в смещениях. Уравнение Навье для статических условий, включая температуру, формулируется в виде

$$-\nabla \cdot (c \nabla \mathbf{u}) = \mathbf{F}.$$

Температурная деформация

Температурные деформации [16] зависят от текущей температуры T , опорной температуры T_{ref} и векторного коэффициента теплового расширения α_{vec} :

$$\varepsilon_{th} = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}]_{th}^T = \alpha_{vec} (T - T_{ref}).$$

В зависимости от модели материала α_{vec} настраивается по-разному: для изотропных, упругопластических, гиперэластичных и вязкоупругих материалов. Для изотропного материала векторный коэффициент записывается в виде

$$\alpha_{vec} = [\alpha \quad \alpha \quad \alpha \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

Анализ процессов деформации, обусловленной изменением температуры, осуществляется с использованием энтропии. Для линейного термоупругого твердого тела энтропия на единицу объема составляет

$$S = \rho C_p \log(T / T_0) + S_{elast},$$

где T_0 – контрольная температура; объемная теплоемкость ρC_p принимается независимой от температуры.

Для изотропного материала составляющая, определяемая напряжениями, записывается в виде

$$S_{elast} = \alpha_{vec} \cdot (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Энтропия является функцией состояния и, следовательно, не зависит от скорости деформации.

Физические свойства стали 35Л

Температура	°C	-20	100
Плотность	кг / м ³	7831	7804
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶	1 / °C	12	12.9
Модуль Юнга, 10 ¹¹	Па	212	206
Коэффициент Пуассона		0,287	0,292

Построение модели для расчета тепловой деформации задвижки осуществляется для стационарного режима при небольшом изменении температуры, что упрощает процедуру учета температурных зависимостей коэффициента теплопроводности и модуля упругости.

При моделировании в качестве материала корпуса задвижки и клина принята сталь 35Л. Свойства стали в диапазоне температур от -20 до 100 °С приведены в таблице.

Исследование взаимного влияния линейного расширения трубы и внутренней перемычки

Упрощенная конструкция задвижки представляет собой комбинацию из вертикальной и горизонтальных труб. Между горизонтальными участками располагается клин. Исследование некоторых процессов деформации удобно провести на двумерной модели.

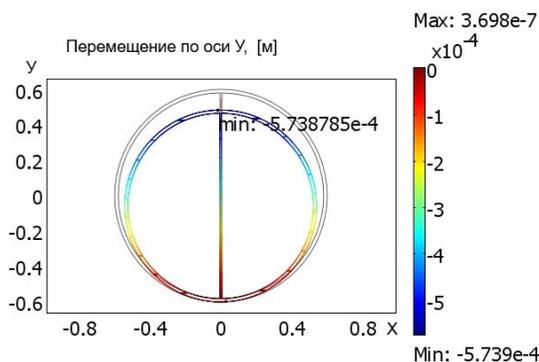


Рис. 2. Распределение смещений в трубе и внутренней перемычке

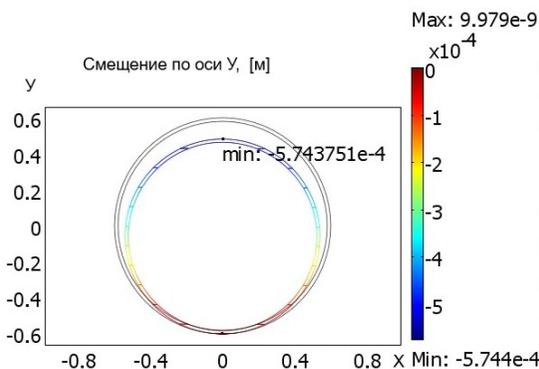


Рис. 3. Распределение смещений в трубе

Сопоставление изменения радиуса трубы и длины стержня при одинаковом снижении температуры и начальном равенстве радиуса и длины показывает с помощью простых формул, что у оболочки в отличие от сплошного цилиндра радиус уменьшается меньше, чем длина стержня, имеющего при начальной температуре длину, равную внутреннему диаметру оболочки. Для проверки были проведены расчеты на двумерных моделях для трубы и трубы с перемычкой. Исходный радиус трубы принят равным $0,6$ м. Начальное значение температуры принято 20 градусов, а конечное – 20 градусов. Модуль Юнга равен $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па.

Деформация трубы без внутренней перемычки меньше, чем с перемычкой. Изменение внутреннего диаметра трубы меньше, чем могло быть изменение длины отдельного стержня. Уменьшение диаметра трубы составляет

$l = 5,744 \cdot 10^{-4}$ м, а уменьшение диаметра трубы с перемычкой - $l = 5,737 \cdot 10^{-4}$ м, т. е. в отдельной трубе без перемычки диаметр уменьшается меньше. В результате возникают термонапряжения в трубе и перемычке. Напряжения в перемычке являются растягивающими, а в трубе – сжимающими. Для трубы с перемычкой имеет значение соотношение сечений трубы и перемычки. Чем больше сечение перемычки, тем больше будет деформироваться труба и превращаться в эллипс. Важно отметить, что влияние трубы на изменение линейного размера перемычки при уменьшении температуры на 40 градусов приводит к отклонению 0,5 мкм, что не может создать значительные напряжения. Наблюдаемая картина смещений приводит к появлению зазора между оболочкой и перемычкой. Для иллюстрации такого явления нужно создать разомкнутую модель, где хотя бы с одной стороны отсутствует механический контакт оболочки и перемычки (стержня). Следовательно, снижение температуры для трубы с перемычкой не может служить причиной появления термонапряжений.

Исследование деформаций и термонапряжений в корпусе задвижки на упрощенной трехмерной модели

Для исследования была принята конструкция, состоящая из горизонтальных участков трубы, между которыми располагается клин, и вертикальной оболочки. В качестве вертикальной составляющей корпуса были рассмотрены два варианта: цилиндрическая труба и пустотелый усеченный конус.

Упрощенная конструкция задвижки с цилиндрическим корпусом представлена на рис. 4. Ввиду ограниченности вычислительных ресурсов размеры модели взяты в уменьшенном масштабе.

Горизонтальный участок содержит два отрезка трубы, между которыми расположен сплошной клин. Вертикальная часть представляет собой оболочку цилиндрической формы, сверху и снизу ограниченную пластинами в форме диска. Для более удобного задания граничных условий в конструкцию добавлены элементы, позволяющие решить проблему фиксации в пространстве без создания существенных искажений условий задачи. В центрах дисков закреплены стержни диаметром 2 см и длиной 3 см, что обеспечивает задание граничных условий для задачи деформации на периферии расчетной области. Жесткая фиксация свободных торцевых поверхностей стержней не препятствует деформациям внутри всей конструкции, так как модуль Юнга принят равным $E = 2 \cdot 10^9$ Па.

Жидкость в модели не предусмотрена, поэтому горизонтальные участки не имеют заглушек.

Для второго варианта вертикальная часть корпуса представлена конической оболочкой (рис. 5), которая сверху и снизу ограничена плоскими пластинами в виде дисков (на рисунке не показано).

Свойства материала задвижки для тепловой задачи и задачи упругой деформации заданы в соответствии с таблицей.

Выбор граничных условий для задачи упругой деформации произведен с учетом удобства последующей обработки результатов расчета. Свободные торцевые поверхности цилиндров зафиксированы по всем направлениям (fixed).

Начальная температура T_0 принята равной 273 К (взята за референсное значение T_{ref}). Конечное значение задано как температура окружающей среды, равная 253 К.

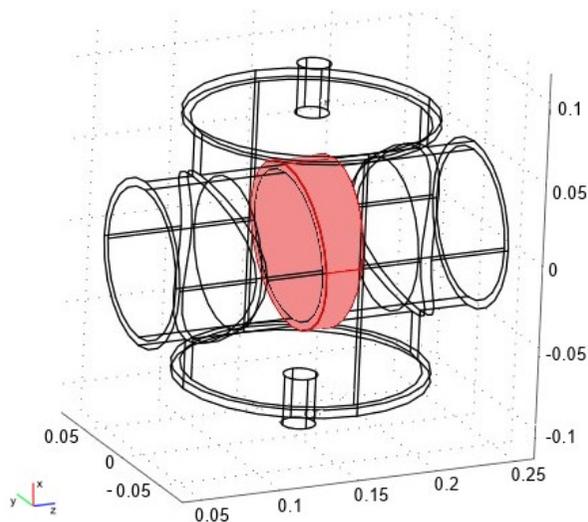


Рис. 4. Геометрическая модель задвижки с цилиндрическим корпусом

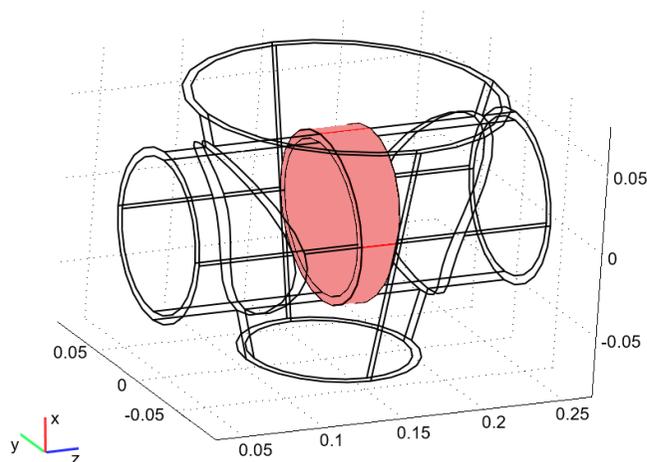


Рис. 5. Геометрическая модель задвижки с конусообразным корпусом

Моделирование процессов деформации при равномерных распределениях температуры не требует решения тепловой задачи. Достаточно задать исходное и конечное значения температуры, чтобы определить перепад температур. Последующие расчеты учитывают параметры материалов и конструктивные особенности, но на конечное распределение температур не оказывают влияния.

Результаты решения задачи для задвижки с цилиндрическим корпусом представлены в виде диаграмм, построенных вдоль верхней линии горизонтальной трубы с координатами: $x: (0,05; 0,05)$, $y: (0; 0)$, $z: (0; 0,23)$ и нижней линии с координатами: $x: (-0,05; -0,05)$, $y: (0; 0)$, $z: (0; 0,23)$. На рис. 6 показаны диаграммы термонапряжений, возникающих на линиях поверхности в результате охлаждения. Диаграммы практически совпадают для обеих линий. Различие наблюдается на участке, соответствующем клину.

Результаты решения задачи для задвижки с коническим корпусом представлены на рис. 7. Диаграммы построены также вдоль верхней линии горизонталь-

ной трубы с координатами: $x: (0,05; 0,05)$, $y: (0; 0)$, $z: (0; 0,23)$ и нижней линии с координатами: $x: (-0,05; -0,05)$, $y: (0; 0)$, $z: (0; 0,23)$.

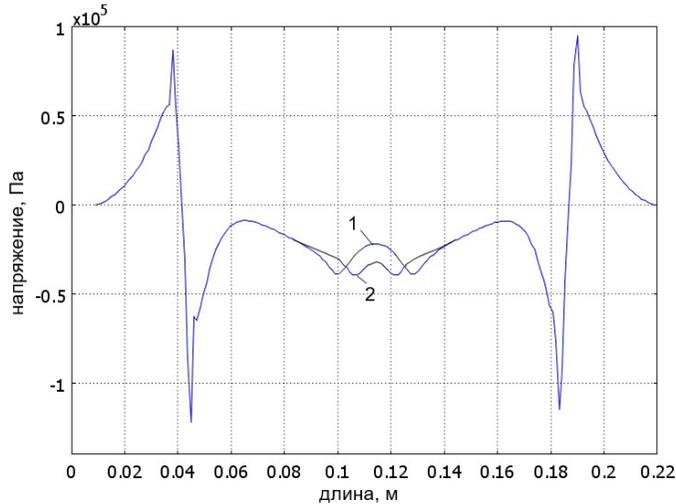


Рис. 6. Диаграмма напряжений по оси Z для задвижки с цилиндрическим корпусом:
1 – при $x = 0.05$ м, $y = 0$; 2 – при $x = -0.05$ м, $y = 0$

Коническая форма корпуса задвижки послужила причиной значительной разницы напряжений в области клина на верхней и нижней линиях поверхности трубы. Кроме того, по сравнению с расчетами для цилиндрического корпуса значения напряжений возросли почти в десять раз.

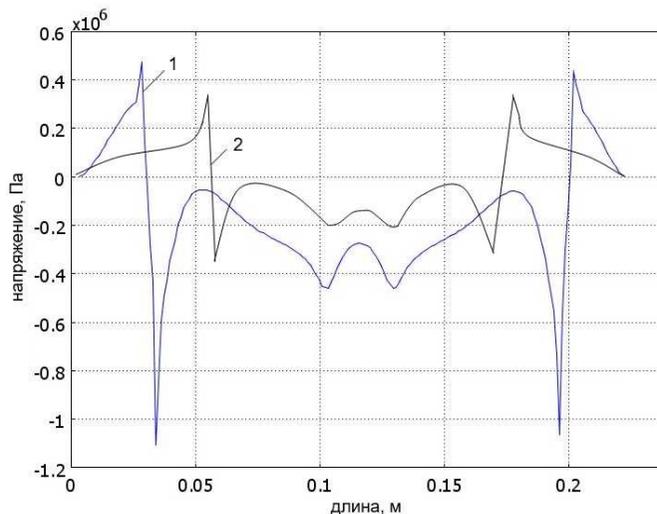


Рис. 7. Диаграмма напряжений по оси Z для задвижки с коническим корпусом:
1 – при $x = 0.05$ м, $y = 0$; 2 – при $x = -0.05$ м; $y = 0$

Резкие переходы на диаграммах обусловлены переходом через стенку конической оболочки и в месте соприкосновения трубы и клина. Первое отличие диаграмм на верхней и нижней линиях касается условий перехода через коническую оболочку. В верхней области трубы перепад напряжений значительно заметнее, чем на нижнем участке трубы. Гораздо более значительные напряжения возникают в местах контакта трубы и клина. Ввиду разной толщины клина в верхней

и нижней частях диаграммы смещены вдоль оси Z . Значения напряжений несопоставимы с величиной модуля Юнга и не могут привести к повреждению задвижки в статическом состоянии. Определение интегральных значений сжимающих усилий в пределах клина сложно выполнить, так как по окружности кольцевой поверхности контакта клина и седла знак напряжений меняется.

Различие объясняется взаимосвязанностью напряжений по всем направлениям. Полученные значения способны затруднить открывание задвижки. Дополнительно нужно принимать во внимание усилие, прилагаемое со стороны штока. В итоге силы трения между поверхностями клина и седла становятся больше начального усилия. Для их преодоления необходимы дополнительные меры, в частности подогрев.

Проектированию конструкций задвижек и определению параметров процессов тепловой деформации посвящено немало работ [17–19]. Развитие вычислительных средств позволяет более детально анализировать не только установившиеся процессы, рассмотренные в данной работе, но и динамические, характерные для задачи подогрева. Применяемый на практике подогрев задвижки в зимнее время с помощью парогенератора требует совершенствования с целью исключения ручного труда и перевозки оборудования к месту расположения.

Заключение

Исследование процесса деформаций и напряжений в задвижке при снижении температуры окружающей среды выявило основную причину заклинивания – возникновение неравномерных по высоте горизонтальных смещений, вызванное формой корпуса, отличающейся от цилиндрической. Устранение заклинивания возможно как с помощью подогрева в момент открывания задвижки, так и с помощью контроля температуры среды и регулирования прижимного усилия.

Предлагаемые мероприятия позволят повысить быстродействие систем управления задвижками и их надежность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шегельман И.Р., Васильев А.С., Шукин П.О. Задвижка запорная для трубопровода // Наука и бизнес: пути развития. Тамбов: Фонд развития науки и культуры, 2015. № 8 (50). С. 36–38.
2. Жук Д.И., Гаффанов Р.Ф., Шенятский А.В. Анализ влияния механических воздействий на уплотнительные поверхности запорно-регулирующей трубопроводной арматуры // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2016. Т. 19, № 2. С. 27–29.
3. Настека В.В., Коренякин А.Ф., Низамов Н.Ф., Чирков Е.Ю., Кушнаренко В.М., Каменев С.В. Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки // Вестник Оренбургского государственного университета. 2013. № 1 (150). С. 212–218.
4. Какузин В.Б., Филиппов Н.Г. Проблемы настройки электроприводов задвижек // Арматуростроение. 2008. № 4 (55). С. 74–76.
5. Берникер Е.И. Посадки с натягом в машиностроении. Справочное пособие. М.–Л.: Машиностроение, 1966. 168 с.
6. Жуковский В.К., Гохман А.Р. Связь коэффициента линейного температурного расширения с остаточными напряжениями // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 4. С. 90–96.
7. Подрезова И.С., Шутова Л.В., Ульянова Ю.Е., Пугачева О.Ю., Елзов Ю.Н. Анализ причин заклинивания и обрывов штоков трубопроводной электроприводной арматуры // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 4(13). С. 32–37.
8. Кузнецова Н.В. Трубопроводная арматура. Конструирование и расчет задвижек стальных клиновых. Монография. М.: Спутник, 2010. С. 175.
9. Гаффанов Р.Ф., Сериков Д.Ю. Недостатки методики расчета наплавки на примере клиновых задвижек и сильфонных клапанов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на

- море. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2019. № 7. С. 38–41.
10. *Муратаев Ф.И.* Исследование разрушения литого корпуса задвижки магистрального нефтепровода // Профессиональные коммуникации в научной среде – фактор обеспечения качества исследований. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Под общ. ред. С.В. Юдиной. М.: Перо, 2017. С. 27–32.
 11. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М., Чернова А.Ю.* Оценка напряженно-деформированного состояния запорной арматуры с учетом рабочих параметров на примере клиновой задвижки ЗКЛ2 300-25 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: Тест-эл, 2016. Т. 82, № 11. С. 61–66.
 12. *Закирничная М.М., Кульшарипов И.М.* Особенности расчета ресурса безопасной эксплуатации клиновых задвижек с учетом рабочих параметров в технологических трубопроводах // Нефтегазовое дело. Уфа: Изд-во Уфимского гос. нефт. техн. ун-та, 2016. Т. 14. № 4. С. 121–125.
 13. *Васильев А.С., Суханов Ю.В., Щукин П.О., Галактионов О.Н.* Совершенствование эксплуатационных показателей запорной трубопроводной арматуры // Инженерный вестник Дона. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр высшей школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Южный федеральный университет, 2014. № 3 (30). С. 14.
 14. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
 15. *Барботько М.А.* Численное моделирование термических напряжений и деформаций в цилиндре с упругопластической оболочкой и вязкоупругим наполнителем // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 16–23.
 16. *Алферов В.И., Степешкова Н.А.* Применение МКЭ для решения тепловой и деформационной задач расчета сварочных деформаций судовых корпусных конструкций // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2010. № 56 (340). С. 147–162.
 17. *Глушко А.В., Логинова Е.А., Астахова Е.В.* Новая задача термоупругости в плоскости с разрезом // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2018. № 2. С. 156–172.
 18. *Глухов В.И., Шалай В.В., Гриневич В.А., Панин Ю.Н.* Геометрическое моделирование деталей клинового затвора для обеспечения герметичности задвижек // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 8-й международной научно-технической конференции. Омск: Изд-во Омского гос. техн. ун-та, 2018. С. 193–194.
 19. *Майский Р.А., Чернова А.Ю.* Возможности программных комплексов на основе метода конечных элементов при оценке работоспособного состояния элементов трубопроводной арматуры // Информационные технологии. Проблемы и решения. Уфа: Изд-во Уфимского гос. нефт. техн. ун-та, 2014. № 1–2. С. 47–49.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.

MODELING OF DEFORMATION PROCESSES IN A VALVE

A.A. Bazarov, N.V. Bondareva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *A set of issues on computer modeling of valve deformation processes at lower temperatures are reviewed in the publication. Some types of valves which are used to shut off fluid flows are exposed to jamming. The problem relates to valves with a solid rigid wedge. It is often show up with temperature drop down to negative values. The valve electric drives have enough power, thus combining with the presence of gearboxes it creates*

*Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Nataliya V. Bondareva, Postgraduate Student.*

a force, that sometimes leads to a breakage of the valve stem on the opening process. The purpose of the work is to define the influence of geometric and physical parameters in the valve on the development of deformations and thermal stresses resulting in jamming. To determine the jamming cause, an analysis of various options was made. The options include the occurrence of deformations of structural elements which are associated with the processing technology of the adjacent surfaces of the wedge and saddle, using various materials, and calculations of the deformation processes for some simple structures were performed. Mathematical modeling was performed using the finite element method. Due to the slow change in ambient temperature, stationary three-dimensional models were used for calculations. The temperature change is set in the issue through the fixed differential. The design features of valves with a hard wedge require careful machining to ensure a tight fit and eliminate leaks. Due to the complexity of access to the internal cavity of the valve for processing, a collapsible design is provided, which allows to achieve high quality surfaces and to avoid jamming. The use of different grade steels and the possibility of surface hardening during machining leads to a difference in physical properties such as coefficient of thermal expansion. However, according to the calculations, with the small thickness of the parts and the hardening depth, the influence of coefficient of thermal expansion is insignificant. Another reason for the difference in strain is the difference in elongation of the rod and the cylindrical shell. In the given temperature range for materials with low coefficients of thermal expansion, the difference in the geometric measurements turned out to be low and comparable with the calculation error. The study of the geometric shape influence on the relative deformations of the valve elements demonstrated that the use of cylindrical shells and continuous cylinders in the design do not lead to the development of thermal stresses. Even the shape of the wedge does not affect the magnitude of the deformations. However, the production of the vertical part of the body in a conical shell shape leads to the appearance of significant deviations in the deformation magnitude of the mating surfaces. In the actual valves, the body has a more complex shape, but the size ratio corresponds to the simplified model considered before. Conclusion: to avoid jamming, the design must be symmetrical. Since this solution is more material-intensive, it is required to equip the valves with heating systems to balance deformations.

Keywords: valve with a hard wedge, jamming, thermal deformation, finite element method.

REFERENCES

1. *Shegelman I.R., Vasilyev A.S., Shchukin P.O.* Zadvizhka zapornaya dlya truboprovoda. Nauka i biznes: puti razvitiya. Izdatelstvo: Fond razvitiya nauki i kultury. 2015. № 8 (50). S. 36–38.
2. *Zhuk D.I., Gaffanov R.F., Shchenyatskiy A.V.* Analiz vliyaniya mekhanicheskikh vozdeystviy na uplotnitelnye poverkhosti zaporno-reguliruyushchey armatury. Vestnik IZhGTU imeni M.T. Kalashnikova. Izdatelstvo: Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet im. M.T. Kalashnikova. 2016. T. 19, № 2. S. 27–29.
3. *Nasteka V.V., Korenyakin A.F., Nizamov N.F., Chirkov Ye.Yu., Kushnarenko V.M., Kamenev S.V.* Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metalla kprpusa fontannoy armatury do i posle naplavki. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta (Orenburg). Izdatelstvo: Orenburgskiy gosudarstvennyy universitet. 2013, № 1 (150). S. 212–218.
4. *Kakuzin V.B., Filippov N.G.* Problemy nastroyki elektroprivodov zadvizhek. Armaturstroenie. 2008. № 4 (55). S. 74–76.
5. *Berniker Ye.I.* Posadki s natyagom v mashinostoenii. Spravochnoe posobie. M.L.: Mashinostroenie, 1966. 168 s.
6. *Zhukovskiy V.K., Gokhman A.R.* Svyaz koefficienta lineynogo temperaturnogo rasshireniya s ostatochnymi napryazheniyami. Gurnal tekhnicheskoy fiziki, 2009, t. 79, vyp. 4, s. 90–96.
7. *Kuznetsova N.V.* Truboprovodnaya armatura. Konstruirovaniye i raschet zadvizhek stalnykh klinovykh. Izdatelstvo: Sputnik. Moskva 2010. 175 s.
8. *Muratayev F.I.* Issledovaniye razrusheniya litogo korpusa zadvizhki magistralnogo nefteprovoda. Professionalnye kommunikatsii v nauchnoy srede – factor obespecheniya kachestva issledovaniy.

- Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod obschey redaktsiyey S.V. Yudinoy. Izdatelstvo "Pero" Moskva. 2017, s. 27–32.
9. *Gaffanov R.F., Serikov D.Yu.* Nedostatki metodiki rascheta naplavok na primere klinovykh zadvizhek i silfonnykh klapanov. Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. Izdatelstvo: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut organizatsii, upravleniya i ekonomiki neftegazovoy promyshlennosti (Moskva) 2019. № 7, s. 38–41.
 10. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M., Chernova A.Yu.* Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zapornoy armatury s uchetom rabochikh parametrov na primere klinovoy zadvizhki ZKL2 300-25. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Izdatelstvo "Test-zl" (Moskva). 2016. T. 82, № 11, s. 61–66.
 11. *Podrezova I.S., Shutova L.V., Ulyanova Yu.Ye., Pugacheva O.Yu., Yelzhov Yu.N.* Analiz prichin zaklinivaniya i obryvov shtokov truboprovodnoy elektroprivodnoy armatury. Globalnaya yadernaya bezopasnost, 2014, № 4(13), s. 32–37.
 12. *Zakirnichnaya M.M., Kulsharipov I.M.* Osobennosti rascheta resursa bezopasnoy ekspluatatsii klinovykh zadvizhek s uchetom rabochikh parametrov v tekhnologicheskikh truboprovodakh. Neftegazovoe delo. Izdatelstvo: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet (Ufa). 2016. T. 14, № 4, s. 121–125.
 13. *Vasilyev A.S., Sukhanov Yu.V., Shchukin P.O., Galaktionov O.N.* Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh pokazateley zapornoy truboprovodnoy armatury. Inzhenernyy vestnik Dona. Izdatelstvo: Severo-Kavkazskiy nauchnyy tsentr vysshey shkoly federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Yuzhnyy federalnyy universitet (Rostov-na-Donu) 2014. № 3 (30), s. 14.
 14. *Zenkevich O.* Metod konechnykh elementov v tekhnike. M.: Mir, 1975. 541 s.
 15. *Barbotko M.A.* Chislennoe modelirovanie termicheskikh napryazheniy i deformatsiy v tsilindre s uprugoplasticheskoy obolochkoy i vyazkouprugim zapolnitelem. Vestnik inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federal'nogo universiteta. Izdatelstvo: Dalnevostochnyy federalnyy universitet (Vladivostok). 2018. № 4 (37). s. 16–23.
 16. *Alferov B.I., Steshenkova N.A.* Primenenie MKE dlya resheniya teplovy i deformatsionnoy zadach rascheta svarochnykh deformatsiy sudovykh korpusnykh konstruksiy. Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova. Izdatelstvo: Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr (Sankt-Petersburg) 2010. № 56 (340). s. 147–162.
 17. *Glushko A.V., Loginova Ye.A., Astakhova Ye.V.* Novaya zadacha termouprugosti v ploskosti s razrezom. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika. Izdatelstvo: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet (Voronezh) 2018. № 2, s. 156–172.
 18. *Glukhov V.I., Shalay V.V., Grinevich V.A., Panin Yu.N.* Geometricheskoe modelirovanie detaley klinovogo zatvora dlya obespecheniya germetichnosti zadvizhek. Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Materialy 8-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Izdatelstvo: Omskiy gosudarstvennyy tekhnicheskoy universitet. 2018. S. 193–194.
 19. *Mayskiy R.A., Chernova A.Yu.* Vozmozhnosti programmnykh kompleksov na osnove metoda konechnykh elementov pri otsenke rabotodosobnogo sostoyaniya elementov truboprovodnoy armatury. Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya. Izdatelstvo: Ufimskiy gosudarstvennyy neftyanoy tekhnicheskoy universitet (Ufa) 2014. № 1–2, s. 47–49.

УДК 62-533.7

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А.В. Рахаев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Предотвращение и ликвидация аварийных режимов, а также уменьшение потерь энергии в электрических сетях являются актуальными задачами. Решение данных задач в некоторых ситуациях напрямую связано с регулированием напряжения. Повышение надежности работы электроэнергетической системы, оборудования электростанций и подстанций, а также снижение потерь в электрических сетях требуют оптимального регулирования напряжения. В связи с непрерывно меняющейся схемно-режимной обстановкой в электроэнергетических системах, высокой загруженностью диспетчерского и оперативного персонала, особенно в периоды ремонтной кампании, необходимостью учета ряда факторов, влияющих на режим работы электроэнергетической системы, регулирование напряжения диспетчерским и оперативным персоналом «вручную» нецелесообразно, необходима автоматизация процесса регулирования напряжения в электрических сетях.*

В статье рассмотрены применяемые в настоящее время принципы регулирования напряжения в электрической сети Единой энергетической системы России, изложены основные практические задачи, связанные с регулированием напряжения. Для решения перечисленных задач предложено создание специальной режимной автоматики, а именно централизованной системы автоматического регулирования напряжения. Разработаны структура и алгоритм работы централизованной системы автоматического регулирования напряжения.

Реализация централизованной системы автоматического регулирования напряжения в Единой энергетической системе России позволит снизить потери электроэнергии, а также обеспечить допустимые уровни напряжения по требованиям качества электроэнергии и условиям работы изоляции электрооборудования и предотвратить (ликвидировать) недопустимые токовые перегрузки линий электропередачи и оборудования в тех случаях, когда выполнение данной задачи с использованием существующих средств затруднено. Реализация такой автоматики также позволяет разгрузить диспетчерский и оперативный персонал.

***Ключевые слова:** автоматизация регулирования напряжения, управляющий вычислительный комплекс, расчетная модель оценивания состояния, оптимизация режима по напряжению и реактивной мощности, график напряжения.*

Введение

В настоящее время сохраняют актуальность такие задачи, как повышение надежности работы Единой энергетической системы (ЕЭС) России и улучшение качества электрической энергии. Для их решения необходимы контроль параметров электроэнергетического режима и регулирование их в допустимых пре-

Рахаев Александр Валерьевич, аспирант.

делах. Одним из таких параметров является напряжение на распределительных устройствах объектов электроэнергетики ЕЭС России.

Существующие принципы регулирования напряжения в ЕЭС России

Для контроля и регулирования уровней напряжения в ЕЭС России филиалами АО «СО ЕЭС» в пределах собственных операционных зон назначаются контрольные пункты по напряжению и задаются графики напряжения в них. Как правило, контрольными пунктами являются системы (секции) шин напряжением 110 кВ и выше подстанций и электростанций. В таблице показан пример графика напряжения. Он представляет собой верхнюю и нижнюю границы на каждый час суток. Диспетчерский персонал контролирует, чтобы уровни напряжения в контрольных пунктах не выходили за границы графика напряжения.

График напряжения в контрольном пункте

Объект	Класс напряжения, кВ	Граница	Час суток						
			1	2	3	...	22	23	24
Подстанция 500 кВ А	500	Верхняя	525	525	525	525	525	525	525
		Нижняя	490	490	490	490	490	490	490

При необходимости диспетчерский персонал дает команды на регулирование напряжения следующими способами:

- 1) изменение уставок по напряжению в автоматических регуляторах возбуждения (АРВ) генераторов электростанций;
- 2) переключение ответвлений в устройствах регулирования под нагрузкой (РПН) силовых автотрансформаторов;
- 3) изменение режима работы средств компенсации реактивной мощности.

Определение границ графика напряжения выполняется в соответствии с [1] исходя из требований качества электроэнергии [2], нормативных запасов статической устойчивости по напряжению в узлах нагрузки [3], условий работы изоляции электрооборудования по [4].

Диспетчерский и оперативный персонал объектов электроэнергетики осуществляет контроль напряжения на системах (секциях) шин. При необходимости изменения значения напряжения диспетчеры отдают команды оперативному персоналу на регулирование напряжения. Данную задачу оперативный персонал может выполнить следующими способами:

- 1) изменение уставок автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) на электростанциях;
- 2) изменение эксплуатационного состояния средств компенсации реактивной мощности (СКРМ);
- 3) изменение коэффициентов трансформации автотрансформаторов или трансформаторов.

Анализ существующих проблем регулирования напряжения

На текущий момент при эксплуатации линий электропередачи (ЛЭП) и оборудования электростанций, подстанций, а также при управлении электроэнергетическим режимом сохраняют актуальность следующие проблемы:

1) высокие уровни потерь активной мощности и электроэнергии на нагрев проводов и коронный разряд;

2) значительные перетоки реактивной мощности по ЛЭП и оборудованию, что приводит к их недопустимым токовым перегрузкам;

3) трудности с обеспечением уровней напряжения внутри границ графиков напряжения, что ведет к снижению качества электроэнергии, а также интенсивному старению изоляции электрооборудования.

На рис. 1 приведены потери активной мощности в воздушной линии (ВЛ) 750 кВ Калининская АЭС – Владимирская [5]. Как видно из рисунка, суммарные потери составляют от 14 до 30 МВт, что довольно значительно.



Рис. 1. Результаты измерения потерь мощности на корону и в проводах ВЛ 750 кВ Калининская АЭС – Владимирская, 04.01.2011

На основании результатов исследований коронного разряда, проведенных на опытных участках ВЛ, а также на ВЛ, находящихся в эксплуатации, установлена зависимость потерь мощности на коронный разряд от напряженности электрического поля (а следовательно, и от величины напряжения), а также от погодных условий [6–9] (рис. 2).

Ввиду значительного уровня потерь на коронный разряд задача снижения интенсивности коронного разряда имеет важное экономическое значение. Как известно, интенсивность коронного разряда зависит от напряженности электрического поля, которая, в свою очередь, зависит от величины напряжения [6–9]. Отсюда следует, что за счет снижения напряжения можно уменьшить потери на коронный разряд. Однако со снижением напряжения возрастают потери на нагрев проводов.

На рис. 3 [7] представлены зависимости потерь электроэнергии на коронный разряд, на нагрев, суммарных потерь электроэнергии за год в ВЛ 750 кВ от напряжения. Видно, что функция зависимости суммарных потерь имеет экстремум, в котором потери минимальны. Значение напряжения, при котором достигается данный минимум, является оптимальным по критерию минимизации потерь в сети. В связи с тем, что нагрузка ВЛ, схемно-режимная ситуация и погодные условия изменяются с течением времени, для достижения минимума потерь в сети требуется непрерывное регулирование напряжения. Очевидно, что необходимо снижать напряжение в период «плохих» погодных условий (дождь, снег, изморозь) и повышать его в период хорошей погоды. Идея регулирования

напряжения в период «плохих» погодных условий высказывалась В.И. Левитовым [7] в отношении ВЛ напряжением 750 кВ.

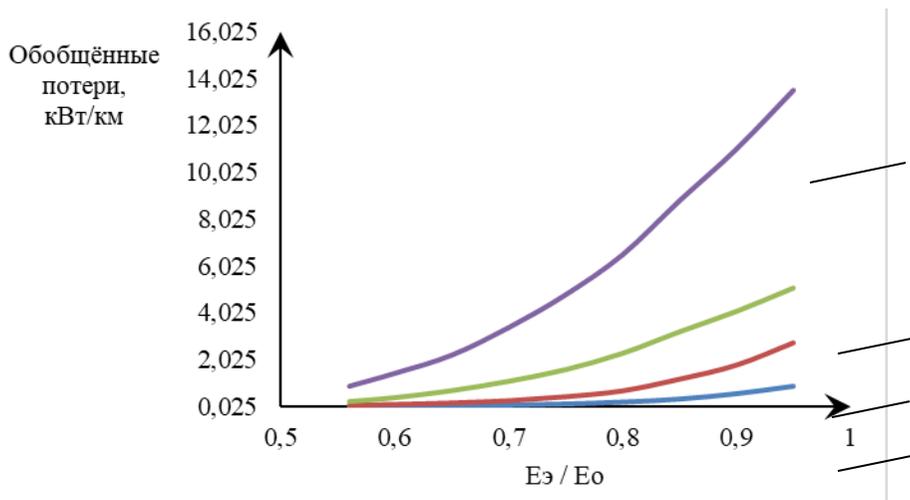


Рис. 2. Обобщенные характеристики потерь на коронный разряд для разных групп погоды:

$Eэ$ – эквивалентная напряженность электрического поля; $Eо$ – начальная напряженность электрического поля; 1 – «хорошая погода»; 2 – сухой снег; 3 – дождь; 4 – изморозь. Классификация погодных условий приведена в соответствии с [6]

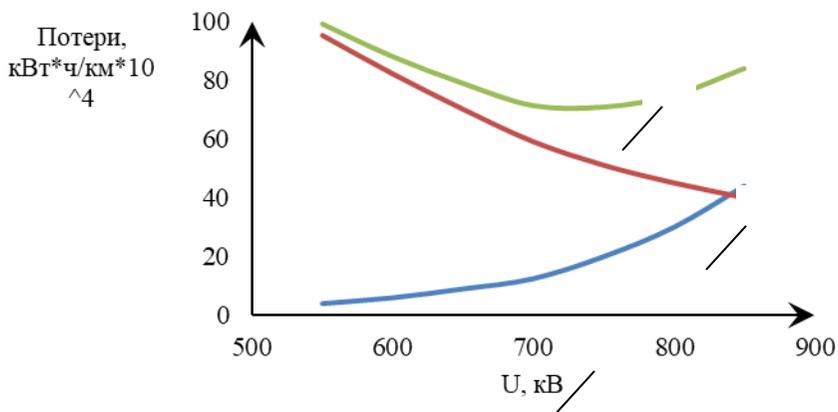


Рис. 3. Зависимости годовых потерь электроэнергии от линейного напряжения для ВЛ 750 кВ:

1 – потери мощности на коронный разряд; 2 – потери мощности на нагрев; 3 – суммарные потери мощности

Оперативное регулирование (регулирование персоналом «вручную») напряжения с целью снижения потерь в сети нецелесообразно в связи с тем, что, как было сказано выше, необходимо непрерывное регулирование, в то время как диспетчерский и оперативный персонал обязаны заниматься более приоритетными задачами: проведение ремонтной кампании, ликвидация аварий, планирование режима и т. д.

Автоматическое регулирование напряжения позволяет осуществить непрерывное регулирование, не загружая при этом персонал.

Говоря о необходимости регулирования напряжения с целью снижения потерь электроэнергии в электрической сети, стоит упомянуть, что на текущий момент при реализации процедуры выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО), а также при определении прогнозного диспетчерского графика (ПДГ) не выполняется оптимизация режима электрической сети по напряжению и реактивной мощности.

Как было сказано выше, при составлении графиков напряжения в контрольных пунктах руководствуются необходимостью обеспечения допустимой работы изоляции электрооборудования, устойчивости нагрузки и требований по качеству электроэнергии. Минимизация потерь в электрической сети при составлении графиков напряжения не осуществляется.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что задача минимизации потерь в электрической сети посредством оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности или уточнения графиков напряжения на стадии краткосрочного планирования по состоянию на сегодняшний день не решается. Выполнение оптимизации режима по напряжению и реактивной мощности на стадии краткосрочного планирования приведет к усложнению процедуры ВСВГО и расчета ПДГ. Выполнение минимизации потерь в электрической сети при составлении графиков напряжения приведет к увеличению нагрузки персонала диспетчерского центра, выполняющего подготовку графиков напряжения в контрольных пунктах, а также к усложнению выполнения графиков напряжения диспетчерским и оперативным персоналом, соответственно к возрастанию нагрузки на данный персонал.

Описанное обстоятельство является еще одним доводом в пользу автоматизации регулирования напряжения.

Предотвращение недопустимых токовых перегрузок можно осуществить несколькими способами в зависимости от той или иной ситуации. В некоторых случаях ликвидация токовых перегрузок наиболее целесообразна посредством регулирования напряжения. Для своевременного регулирования напряжения, а также снятия нагрузки диспетчерского и оперативного персонала необходима автоматизация регулирования напряжения.

В процессе работы энергосистемы может возникнуть угроза выхода напряжения в контрольных пунктах за границы графика напряжения. В некоторых ситуациях предотвращение такого нарушения потребует изменения режима работы нескольких объектов. Диспетчерский персонал в такой ситуации обязан решить, на какие объекты необходимо воздействовать и какие управляющие воздействия на данные объекты выдать. Здесь, как и в предыдущих случаях, в целях исключения ошибок диспетчера, а также для сокращения времени на выбор управляющих воздействий необходимо автоматическое регулирование.

Таким образом, можно отметить необходимость организации автоматического процесса регулирования напряжения в целях:

- снижения потерь мощности и электроэнергии в сети;
- предотвращения при необходимости недопустимых токовых перегрузок ЛЭП и оборудования;
- предотвращения при необходимости нарушений графиков напряжения;
- уменьшения нагрузки персонала;

– сокращения времени на реализацию управляющих воздействий.

Стоит упомянуть, что вышеописанные проблемы регулирования напряжения имеют место в зарубежных энергосистемах. Так, в [15] описано, что дефицит реактивной мощности может послужить основной причиной развития аварий, как это случилось в энергосистеме Северной Америки 14 августа 2003 г. В [18] показана проблема регулирования напряжения в сети с электростанциями, работающими на нетрадиционных источниках электроэнергии, режим работы которых, а соответственно и режим работы прилегающей к таким электростанциям сети, зависит от погодных условий. Проблема обеспечения допустимых уровней напряжения на объектах электроэнергетики также обсуждалась в [21, 23, 25, 27, 28, 29, 31]. Необходимость снижения потерь мощности и электроэнергии в электрической сети обозначена в работах [20, 21, 22, 24, 26, 30, 31].

Проблема неэффективности местного регулирования напряжения и предпосылки к переходу на централизованное регулирование обозначены в статьях [15, 18, 23, 25, 27, 28, 29, 31, 33].

Описание централизованной системы автоматического регулирования напряжения

В целях автоматизации процесса регулирования напряжения, предотвращения нарушения графиков напряжения, снижения потерь электроэнергии поставлена задача разработки специальной режимной автоматики – централизованной системы автоматического регулирования напряжения (ЦС АРН).

ЦС АРН должна состоять из двух уровней. Верхний уровень представляет собой управляющий вычислительный комплекс (УВК). УВК предназначен для решения следующих задач:

1) расчеты оптимизации электрической сети, а именно выбор оптимальных значений реактивных мощностей, вырабатываемых генераторами электростанций, коэффициентов трансформации автотрансформаторов, состояния СКРМ;

2) передача по каналам связи рассчитанных оптимальных параметров в виде задания устройствам нижнего уровня;

3) прием от устройств нижнего уровня необходимой информации (состояние устройств нижнего уровня, сообщения о выполнении/невыполнении задания и т. д.).

Нижний уровень представляет собой устройства, расположенные на электростанциях и подстанциях и выполняющие следующие задачи:

1) прием задания от УВК верхнего уровня;

2) осуществление необходимых воздействий на системы АРВ генераторов, системы автоматического управления (САУ) СКРМ, системы автоматического регулирования коэффициента трансформации;

3) направление в УВК верхнего уровня необходимой информации.

Устройства нижнего уровня следует размещать на объектах с регулировочным диапазоном по реактивной мощности, достаточным для влияния на режим работы прилегающей сети (мощные электростанции, подстанции с СКРМ).

Расчеты оптимизации электрической сети должны выполняться циклически через определенные промежутки времени, ограничиваемые временем

выполнения расчетов УВК, передачи информации от УВК в устройства нижнего уровня и обратно, выполнения задания устройством нижнего уровня.

Оптимизация должна производиться на расчетной модели энергосистемы, где установлена ЦС АРН. Так как система осуществляет непрерывное регулирование, расчетная модель должна отображать текущее состояние энергосистемы (потребление/генерация в узлах, перетоки по ветвям должны соответствовать фактическому режиму работы энергосистемы). Для этой цели подходит расчетная модель оценивания состояния, применяемая в диспетчерских центрах АО «СО ЕЭС». Данная модель реализована в ПК «КОСМОС». Наличие в диспетчерских центрах достаточной телеинформации, передаваемой с объектов (телеизмерения параметров электроэнергетического режима, телесигналы состояния оборудования), возможность ввода телеинформации в расчетную модель оценивания состояния в ПК «КОСМОС» позволяют смоделировать фактический режим работы энергосистемы. В связи с этим установка УВК верхнего уровня наиболее целесообразна в здании диспетчерского центра.

На рис. 4 представлена структура ЦС АРН с двумя устройствами нижнего уровня. Одно расположено на электростанции А и воздействует на АРВ генераторов. Второе расположено на подстанции Б и воздействует на САУ управляемого шунтирующего реактора (УШР), а также на автоматику управления шунтирующим реактором (ШР). УВК получает необходимую телеинформацию от оперативно-информационного комплекса (ОИК) диспетчерского центра.



Рис. 4. Структура ЦС АРН

Стоит также отметить, что в зарубежных энергосистемах уже функционируют автоматические системы, назначение, принципы работы и структура которых подобны рассматриваемой в настоящей статье ЦС АРН. В ЕЭС России подобные системы на текущий момент отсутствуют, что подчеркивает целесообразность создания их в будущем.

Например, согласно [12] во Франции есть несколько централизованных систем управления с принципом действия, аналогичным рассмотренному выше. Данные системы являются упрощенными: их задачей является только поддержание в допустимых пределах уровней напряжения в контрольных пунктах.

Выбор оптимальных управляющих воздействий должен осуществляться посредством определенного метода оптимизации. Критерием оптимальности является минимум потерь в сети ΔP :

$$\Delta P \Rightarrow \min. \quad (1)$$

Под данными потерями понимаются суммарные потери в энергосистеме, включающие в себя потери на нагрев проводов ЛЭП, потери на коронный разряд, потери в трансформаторах и автотрансформаторах. Выше отмечалась особенность потерь на коронный разряд – их зависимость от погодных условий. Данное обстоятельство необходимо учесть в алгоритме ЦС АРН. Текущие потери на коронный разряд можно определить как разность суммарных потерь в ЛЭП и потерь на нагрев проводов $\Delta P_{НАГ}$ по формуле (2). Суммарные потери в ЛЭП определяются, в свою очередь, как разность перетоков активной мощности в начале ЛЭП P_1 и в конце P_2 . Перетоки активной мощности в начале и в конце ЛЭП определяются на основании телеметрической информации.

$$\Delta P_{кор} = P_1 - P_2 - \Delta P_{наг}. \quad (2)$$

Потери на нагрев можно определить по формуле

$$\Delta P_{наг} = \frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_L^2} \cdot R, \quad (3)$$

где P_L – переток активной мощности по рассматриваемой ЛЭП;
 Q_L – переток реактивной мощности по рассматриваемой ЛЭП;
 U_L – напряжение на рассматриваемой ЛЭП.

Перечисленные параметры определяются на основании телеметрической информации. R – активное сопротивление рассматриваемой ЛЭП (указывается в техническом паспорте).

Подобный алгоритм, позволяющий определить текущие потери на коронный разряд, предложен в [5]. Алгоритм позволяет учесть зависимость потерь на коронный разряд от погодных условий, что позволяет получить в ходе оптимизации корректный результат. При этом не требуется установка каких-либо датчиков погоды, что упрощает и удешевляет систему.

В расчетах необходимо учитывать регулировочные диапазоны по реактивной мощности генераторов электростанций:

$$Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max}, \quad (4)$$

где Q_i – реактивная мощность, вырабатываемая i -м генератором;
 $Q_{i \min}$ и $Q_{i \max}$ – соответственно минимальный и максимальный пределы по реактивной мощности i -го генератора.

Как сказано выше, ЦС АРН должна, при необходимости, предотвращать выход напряжения в контрольных пунктах за границы графика напряжения. Данное условие должно быть учтено в методе оптимизации ограничением (5):

$$V_{j \min} \leq V_j \leq V_{j \max}, \quad (5)$$

где V_j – напряжение в j -том контрольном пункте;
 $V_{j \min}$ и $V_{j \max}$ – соответственно нижняя и верхняя границы в j -том контрольном пункте.

Также ЦС АРН должна при необходимости предотвращать недопустимые токовые перегрузки:

$$I_v \leq I_{v\max}, \quad (6)$$

где I_v – ток v -й ветви расчетной модели;

$I_{v\max}$ – длительно допустимая токовая нагрузка v -й ветви расчетной модели.

Таким образом, в составе алгоритма работы УВК верхнего уровня должен быть реализован метод оптимизации электрической сети по напряжению и реактивной мощности с ограничениями в виде неравенств (1–6) и равенств (в ходе оптимизации должен получиться установившийся режим, для которого должны выполняться уравнение баланса мощностей, уравнения узловых напряжений). Теория оптимизации электроэнергетических режимов описана в ряде отечественных [10–13] и зарубежных [14] работ. Задача оптимизации решается методами нелинейного программирования. Особенно распространены градиентные методы (в частности, метод приведенного градиента [10]), метод скорейшего спуска [10], метод неопределенных множителей Лагранжа [10], обобщенный метод Ньютона [10]. Все эти методы позволяют решить задачу оптимизации с учетом ограничений в виде равенств. Учет ограничений в виде неравенств (1–6) осуществляется с помощью метода штрафных функций [10].

Стоит также упомянуть о появлении в зарубежных работах новых методов оптимизации. Так в статьях [16, 20, 26, 30] рассмотрен генетический алгоритм, показаны результаты применения данного метода при обеспечении допустимых уровней напряжения и снижении потерь в электрической сети. В [17, 20, 22, 30] рассмотрен метод оптимизации «рой частиц». В [21] исследован «алгоритм серых волков». В [20, 24] затронуты методы искусственного интеллекта.

На текущем этапе в качестве целевой функции для алгоритма ЦС АРН предлагается использовать целевую функцию, реализованную в ПК «КОСМОС» в задаче оптимизации по напряжению и реактивной мощности, как наиболее изученную отечественными учеными и инженерами:

$$\sum_{i=1}^N I_i^2 R_i + \sum_{j=1}^{N_f} U_j^2 g_j \Rightarrow \min, \quad (7)$$

где I_i и R_i – ток в ветви i и ее активное сопротивление;

U_j и G_j – напряжение в узле j и активная проводимость шунта в данном узле.

Уравнения (1–7) являются математической моделью алгоритма ЦС АРН.

Выше были отмечены положительные моменты от реализации ЦС АРН. Нельзя не учитывать, что данная система требует определенных капиталовложений на создание УВК верхнего уровня, устройств нижних уровней и каналов связи.

Вывод о необходимости установки ЦС АРН в той или иной энергосистеме должен осуществляться на основании следующих факторов:

1) частота возникновения нарушений нормального режима работы энергосистемы, связанных с недопустимыми уровнями напряжения, их характер, тяжесть для энергосистемы;

2) количество случаев регулирования напряжения и реактивной мощности персоналом;

3) технико-экономический расчет. Система сводит к минимуму потери

электроэнергии в сети, следовательно, приносит определенную выручку собственнику. В связи с тем, что составные части ЦС АРН (УВК верхнего уровня, устройства нижних уровней, каналы связи) могут находиться в собственности различных субъектов электроэнергетики (субъект оперативно-диспетчерского управления, генерирующие компании, сетевые компании), то прибыль, получаемую в результате снижения потерь, необходимо распределять между данными собственниками в долях от вложенных в создание ЦС АРН инвестиций.

Выводы

В статье рассмотрены существующие и применяемые в настоящее время подходы по контролю за уровнями напряжения на объектах электроэнергетики и способы регулирования напряжения.

Обозначены проблемы, возникающие при эксплуатации энергосистем:

- высокие уровни потерь мощности и электроэнергии на нагрев проводов и коронный разряд;
- риски нарушения графиков напряжения в контрольных пунктах;
- угрозы появления недопустимых токовых перегрузок ЛЭП и оборудования в случае возникновения нерационального распределения перетоков реактивной мощности.

На основании изложенных проблем отмечена необходимость автоматизации процесса по контролю и регулированию напряжения в контрольных пунктах.

В качестве мероприятия по решению описанных проблем в настоящей статье предложена реализация специальной режимной автоматики – централизованной системы автоматического регулирования напряжения. Разработаны структура данной автоматики, ее принципы действия, алгоритмы функционирования. Описана математическая модель.

Внедрение ЦС АРН в ЕЭС России способно принести следующие преимущества:

- 1) автоматическое регулирование напряжения в контрольных пунктах в зависимости от режима работы энергосистемы, а также погодных условий;
- 2) снижение потерь мощности и электроэнергии на нагрев проводов и коронный разряд;
- 3) предотвращение и ликвидация нарушений графиков напряжения в контрольных пунктах, а также недопустимых токовых перегрузок ЛЭП и оборудования;
- 4) более быстродействующее в сравнении с персоналом регулирование напряжения;
- 5) уменьшение роли человеческого фактора в процессе регулирования напряжения.

Наряду с преимуществами показаны и недостатки предлагаемой автоматики:

- 1) необходимость интеграции систем АРВ генераторов, САУ СКРМ в централизованную систему;
- 2) усложнение задач информационной безопасности;
- 3) необходимость подготовки диспетчерского и оперативного персонала к выполнению своих задач с учетом работы ЦС АРН в зоне своей эксплуатационной ответственности.

Внедрение ЦС АРН наиболее целесообразно в электроэнергетических системах, где особенно остро стоят проблемы регулирования напряжения. Стоит

отметить отсутствие подобных систем в ЕЭС России. Реализация предложенной режимной автоматики является принципиально новым мероприятием и актуальным с точки зрения автоматизации управления электроэнергетическими режимами, предотвращения аварийных ситуаций и улучшения экономических показателей работы энергосистемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО 59012820.27.010.001-2013. Правила разработки графика напряжения в контрольных пунктах диспетчерских центров ОАО «СО ЕЭС». Введен 20.03.2014. М.: ОАО «СО ЕЭС», 2014. 14 с. (Стандарт организации).
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Методические указания по устойчивости энергосистем. Утв. приказом Минэнерго России от 03.08.2018 № 630.
4. Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики. Утв. приказом Минэнерго России от 12.07.2018 № 548.
5. *Гаджиев М.Г.* Повышение точности учета потерь мощности на корону при оперативной оптимизации режима ЭЭС: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.14.02. М.: Московский энергетический университет, 2012. 20 с.
6. *Бургодорф В.В., Емельянов Н.П., Тимашева Л.В., Тиходеев Н.Н., Перельман Л.С., Егорова Л.В., Кислова Н.С., Сохакян Р.А.* Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ. М.: Министерство энергетики и электрификации СССР, 1975. 71 с.
7. *Левитов В.И.* Корона переменного тока. Вопросы теории, методов исследования и практических характеристик. М.: Энергия, 1975. 280 с.
8. *Джомовская Л.Ф., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С., Разевиг Д.В., Рябкова Е.Я.* Техника высоких напряжений: Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов / под общ. ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 480 с.
9. *Костюшко В.А.* Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. 84 с. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», вып. 6 (150)].
10. *Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М.* АСУ и оптимизация режимов энергосистем: Учеб. пособие для студентов вузов / под ред. Д.А. Арзамасцева. М.: Высш. шк., 1983. 208 с.
11. *Горнитейн В.М., Мирошниченко Б.П., Пономарев А.В. и др.* Методы оптимизации режимов энергосистем / под ред. В.М. Горнштейна. М.: Энергия, 1981. 336 с.
12. *Веников В.А., Идельчик В.И., Лисеев М.С.* Регулирование напряжения в электроэнергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 216 с.
13. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
14. *Rebecca Ng Shin Mei, Mohd Herwan Sulaiman, Zuriani Mustaffa, Hamdan Daniyal.* Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique. *Applied Soft Computing*, 59 (2017), pp. 210–222.
15. *Abessi, Ahad & Vahidinasab, Vahid & Ghazizadeh, Mohammad.* (2015). Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 7. 1–1. 10.1109/TSG.2015.2410780.
16. *Arif, Md Arifin & Ndoye, Mandoye & Murphy, Gregory & Aganah, Kennedy.* (2017). A stochastic game framework for reactive power reserve optimization and voltage profile improvement. 1–6. 17.1109/ISAP.2017.8071372.

17. *Dong, Yuexin and Honggeng Yang.* A New Approach for Reactive Power/Voltage Optimization Control of Regional Grid. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2010): 1–5.
18. *Kawano, Shunsuke & Yoshizawa, Shinya & Hayashi, Yasuhiro.* (2016). Centralized Voltage Control Method using Voltage Forecasting by JIT Modeling in Distribution Networks. 10.1109/TDC.2016.7520006.
19. *Zengqiang, Mi & Fei, Wang.* (2009). Substation Reactive Power and Voltage Control Using Fuzzy Control Theory. 2009 International Conference on Industrial and Information Systems. 417–420. 10.1109/IIS.2009.85.
20. *Muller, Zdenek & Muller, Miroslav & Tuzikova, Valerya & Thusty, Josef & Cernan, Martin & Beck, Y. & Golan, Gady.* (2016). Novel method of optimization of losses in power grid. 1–5. 10.1109/ICSEE.2016.7806044.
21. *Raj, Saurav & Bhattacharyya, Biplab.* (2016). Weak bus determination and real power loss minimization using Grey wolf optimization. 10.1109/ICPES.2016.7584143.
22. *Rao, N. & B., Jagannath & Jagannadham, Anyapu.* (2015). Optimal reactive power flow control for minimization of active power losses using Particle swarm Optimization. 38–41. 10.1109/PCCCTSG.2015.7503954.
23. *Roytelman I. & Ganesan V.* (2000). Coordinated Local and Centralized Control in Distribution Management Systems. IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 15, Issue: 2, Apr 2000). 718–724. 10.1109/61.853010.
24. *Singh, Pushpendra & Purey, Pradeep & Titare, L & Choube, S.* (2017). Optimal reactive power dispatch for enhancement of static voltage stability using jaya algorithm. 1–5. 10.1109/ICOMICON.2017.8279044.
25. *Soleimani Bidgoli, Hamid & Van Cutsem, Thierry.* (2017). Combined Local and Centralized Voltage Control in Active Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems. Pp. 1–1. 10.1109/TPWRS.2017.2716407.
26. *Sreejaya, P. & Rejitha, R.* (2008). Reactive power and Voltage Control in Kerala Grid and Optimization of Control Variables Using Genetic Algorithm. 2008 Joint International Conference on Power System Technology POWERCON and IEEE Power India Conference, POWERCON 2008. 1–4. 10.1109/ICPST.2008.4745156.
27. *Takahashi, Naoyuki and Yasuhiro Hayashi.* Centralized voltage control method using plural D-STATCOM with controllable dead band in distribution system with renewable energy. 2012. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) (2012). 1–5. 10.1109/ISGTEurope.2012.6465827.
28. *Vovos, Panagis & Kiprakis, Aristides & Wallace, A.R. & Harrison, Gareth.* (2007). Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration. Power Systems, IEEE Transactions on. 22. 476–483. 10.1109/TPWRS.2006.888982.
29. *Masato, Watanabe & Masahito, Miyata & Nobuhiko, Itaya & Tomihiro, Takano.* (2007). Field demonstration and evaluation of centralised voltage control system for distribution network. Power Systems, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Open Access Proc. J., 2017, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 1143–1147.
30. *Yapici, Hamza & Çetinkaya, Nurettin.* (2015). Reduction of power loss using reactive power optimization in a real distribution system. 1–4. 10.1109/INISTA.2015.7276731.
31. *Bakhshideh Zad, Bashir & Lobry, Jacques & Vallee, François.* (2016). A centralized approach for voltage control of MV distribution systems using DGs power control and a direct sensitivity analysis method. 10.1109/ENERGYCON.2016.7513970.
32. *Jinhua, Zhang.* (2009). Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity. Power Systems, IEEE Transactions on. 24. 193–197. 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
33. *Jinhua, Zhang.* (2010). Research on centralized and coordinate controls of multiple HVDC systems in China. 1–5. 10.1109/TDC.2010.5484630.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2020 года

ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF VOLTAGE REGULATION WITHIN THE FRAMEWORK OF DEVELOPING QUESTIONS OF CREATION OF THE CENTRALIZED SYSTEM OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION

A.V. Rakhayev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The prevention and elimination of emergency conditions, as well as the reduction of energy losses in electric networks are urgent tasks. The solution of these problems, in some situations, is directly related to voltage regulation. Improving the reliability of the electric power system, equipment of power plants and substations, as well as reducing losses in electric networks, require optimal voltage regulation. Due to the constantly changing circuit-and-mode situation in electric power systems, the high workload of the dispatching and operational personnel, especially during the repair campaign, the need to take into account a number of factors that affect the operating mode of the electric power system, voltage regulation by dispatching and operational personnel is «manually», necessary automation of the process of voltage regulation in electric networks. The article discusses the current principles of voltage regulation in the electric network of the Unified Energy System of Russia, outlines the main practical tasks related to voltage regulation. To solve these problems, it is proposed to create a special regime automation, namely, a centralized system for automatic voltage regulation. The structure and operation algorithm of a centralized system for automatic voltage regulation are described. The implementation of a centralized system of automatic voltage regulation in the Unified Energy System of Russia will reduce energy losses, as well as ensure acceptable voltage levels according to the requirements of the quality of electricity and working conditions of insulation of electrical equipment and prevent (eliminate) unacceptable current overloads of power lines and equipment in cases where the implementation of this tasks using existing tools are difficult. The implementation of such automation also allows to relieve dispatching and operational personnel.*

Keywords: *voltage regulation automation, control computer complex, calculation model for assessing the state, optimization of voltage and reactive power mode, voltage graph.*

REFERENCES

1. STO 59012820.27.010.001-2013. Rules for developing a voltage schedule at the control points of dispatch centers of OJSC «SO UPS». Introduced on March 20, 2014. - M.: OJSC «SO UPS», 2014. - 14 p. - (Organization Standard).
2. GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility. QUALITY STANDARDS FOR ELECTRIC ENERGY IN GENERAL POWER SUPPLY SYSTEMS.
3. Guidelines for the stability of energy systems, approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated 03.08.2018 No. 630.
4. Rules for preventing the development and elimination of violations of the normal regime of the electrical part of power systems and electric power facilities, approved by order of the Ministry of Energy of Russia dated 12.07.2018 No. 548.
5. *Gadzhiev M.G.* Improving the accuracy of accounting for power losses per crown during operational optimization of the EES mode. dis. ... cand. Phys.-Math. Sciences: 05.14.02. Moscow: Moscow Power Engineering University, 2012.20 p.
6. *Burgodorf V.V., Emelyanov N.P., Timasheva L.V., Tikhodeev N.N., Perelman L.S., Egorova L.V., Kislova N.S., Sokhakyay R.A.* Guidelines for accounting for corona losses and corona interference

Alexander V. Rahaev, Postgraduate Student.

- when choosing AC overhead power lines 330-750 kV and direct current 800-1500 kV. M.: Ministry of Energy and Electrification of the USSR, 1975. 71 p.
7. *Levitov V.I. Corona AC.* Questions of theory, research methods and practical characteristics. M., "Energy", 1975.280 p. with ill.
 8. *Dkhomovskaya L.F., Larionov V.P., Pinal Yu.S., Razevig D.V., Ryabkova E.Ya.* High voltage technique. A textbook for students of electrical and electrical specialties of universities. Under the general ed. D.V. Razeviga. Ed. 2nd, rev. and add. M., «Energy», 1976. 480 p. with ill.
 9. *Kostyushko V.A.* Analysis of calculated and experimental estimates of corona power losses on overhead AC power lines. - M.: NTF «Energoprogress», 2011. - 84 p.: ill. [Library of Electrical Engineering, Appendix to the journal «Energy», Vol. 6 (150)].
 10. *Arzamashev D.A., Bartholomew P.I., Holyan A.M.* ACS and optimization of power system modes: Textbook. manual for university students; Ed. Arzamasheva D.A. - M.: Higher school, 1983. - 208 p. ill.
 11. *Gornstein V.M., Miroshnichenko B.P., Ponomarev A.V. et al.* Methods for optimizing power system modes / Ed. V. M. Gornstein - M. Energy, 1981 - 336 p., ill.
 12. *Venikov V.A., Idelchik V.I., Liseev M.S.* Voltage regulation in electric power systems. - M.: Energoatomizdat, 1985. -- 216 p., ill.
 13. *Idelchik V.I.* Electrical systems and networks: Textbook for universities. - M.: Energoatomizdat, 1989. -- 592 p.: ill.14. Rebecca Ng Shin Mei, Mohd Herwan Sulaiman, Zuriani Mustafa, Hamdan Daniyal. Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique // Applied Soft Computing 59 (2017) 210–222.
 14. *Abessi, Ahad & Vahidinasab, Vahid & Ghazizadeh, Mohammad.* (2015). Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support. IEEE Transactions on Smart Grid. 7. 1-1. 10.1109/TSG.2015.2410780.
 15. *Arif, Md Arifin & Ndoye, Mandoye & Murphy, Gregory & Aganah, Kennedy.* (2017). A stochastic game framework for reactive power reserve optimization and voltage profile improvement. 1-6. 17.1109/ISAP.2017.8071372.
 16. *Dong, Yuexin and Honggeng Yang.* "A New Approach for Reactive Power/Voltage Optimization Control of Regional Grid." 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (2010): 1-5.
 17. *Kawano, Shunsuke & Yoshizawa, Shinya & Hayashi, Yasuhiro.* (2016). Centralized Voltage Control Method using Voltage Forecasting by JIT Modeling in Distribution Networks. 10.1109/TDC.2016.7520006.
 18. *Zengqiang, Mi & Fei, Wang.* (2009). Substation Reactive Power and Voltage Control Using Fuzzy Control Theory. 2009 International Conference on Industrial and Information Systems. 417-420. 10.1109/IIS.2009.85.
 19. *Muller, Zdenek & Muller, Miroslav & Tuzikova, Valerya & Thusty, Josef & Cernan, Martin & Beck, Y. & Golan, Gady.* (2016). Novel method of optimization of losses in power grid. 1-5. 10.1109/ICSEE.2016.7806044.
 20. *Raj, Saurav & Bhattacharyya, Biplab.* (2016). Weak bus determination and real power loss minimization using Grey wolf optimization. 10.1109/ICPES.2016.7584143.
 21. *Rao, N. & B., Jagannath & Jagannadham, Anyapu.* (2015). Optimal reactive power flow control for minimization of active power losses using Particle swarm Optimization. 38-41. 10.1109/PCCCTSG.2015.7503954.
 22. *I. Roytelman & V. Ganesan.* (2000). Coordinated Local and Centralized Control in Distribution Management Systems. IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 15, Issue: 2, Apr 2000). 718-724. 10.1109/61.853010.
 23. *Singh, Pushpendra & Purey, Pradeep & Titare, L & Choube, S.* (2017). Optimal reactive power dispatch for enhancement of static voltage stability using Jaya algorithm. 1-5. 10.1109/ICOMICON.2017.8279044.
 24. *Soleimani Bidgoli, Hamid & Van Cutsem, Thierry.* (2017). Combined Local and Centralized Voltage Control in Active Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Systems. PP. 1-1. 10.1109/TPWRS.2017.2716407.
 25. *Sreejaya, P. & Rejitha, R.* (2008). Reactive power and Voltage Control in Kerala Grid and Optimization of Control Variables Using Genetic Algorithm. 2008 Joint International Conference on Power System Technology POWERCON and IEEE Power India Conference, POWERCON 2008. 1 - 4. 10.1109/ICPST.2008.4745156.
 26. *Takahashi, Naoyuki and Yasuhiro Hayashi.* "Centralized voltage control method using plural D-STATCOM with controllable dead band in distribution system with renewable energy." 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)(2012). 1-5. 10.1109/ISGTEurope.2012.6465827.

27. *Vovos, Panagis & Kiprakis, Aristides & Wallace, A.R. & Harrison, Gareth.* (2007). Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration. *Power Systems, IEEE Transactions on.* 22. 476 - 483. 10.1109/TPWRS.2006.888982.
28. *Masato, Watanabe & Masahito, Miyata & Nobuhiko, Itaya & Tomihiro, Takano.* (2007). Field demonstration and evaluation of centralised voltage control system for distribution network. *Power Systems, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Open Access Proc. J., 2017, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 1143–1147.*
29. *Yapici, Hamza & Çetinkaya, Nurettin.* (2015). Reduction of power loss using reactive power optimization in a real distribution system. 1-4. 10.1109/INISTA.2015.7276731.
30. *Bakhshideh Zad, Bashir & Lobry, Jacques & Vallee, François.* (2016). A centralized approach for voltage control of MV distribution systems using DGs power control and a direct sensitivity analysis method. 10.1109/ENERGYCON.2016.7513970.
31. *Jinhua, Zhang.* (2009). Optimization Study on Voltage Level and Transmission Capacity. *Power Systems, IEEE Transactions on.* 24. 193 - 197. 10.1109/TPWRS.2008.2008609.
32. *Jinhua, Zhang.* (2010). Research on centralized and coordinate controls of multiple HVDC systems in China. 1 - 5. 10.1109/TDC.2010.5484630.

К 115-летию со дня рождения Лонгина Францевича Куликовского



1905–1987

В январе 2020 года исполнилось 115 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Лонгина Францевича Куликовского. Свою научную и педагогическую деятельность Л.Ф. Куликовский начал в 1938 г. в Азербайджанском индустриальном институте. Среди разработанных им промышленных комплексов можно отметить каротажную станцию, установку исследования режима бурения, комплекс измерительных приборов для контроля параметров процесса бурения. Результаты этой плодотворной научной деятельности нашли отражение в изданной им монографии «Электрические измерительные приборы для контроля процессов бурения» (1952 г.).

С 1934 года Л.Ф. Куликовский начинает выполнять исследования в области гальванометрических автокомпенсационных измерительных усилителей. Результаты этих научных разработок опубликованы им в книге «Гальванометрические компенсаторы» (1964 г.).

Особое место в жизни Лонгина Францевича Куликовского занимает период его работы в Куйбышевском индустриальном институте (ныне Самарский государственный технический университет), которую он начал в 1953 г. в должности заместителя директора по научной работе. Именно здесь в полной мере проявился его талант ученого и изобретателя, организатора и педагога. В 1954 г. Лонгин Францевич создает кафедру автоматических, телемеханических и электроизмерительных приборов и устройств, послужившую основой для организации и открытия нового факультета в Куйбышевском индустриальном институте – факультета автоматики и измерительной техники, впоследствии преобразованного в институт автоматики и информационных технологий. Под его руководством проводятся научно-исследовательские работы в области электромеханических и индуктивных измерительных преобразователей, на основе которых разрабатываются и внедряются различные информационно-измерительные приборы. Основные результаты этих исследований изложены им в монографиях «Индуктивные преобразователи перемещений» (1961 г.) и «Индуктивные преобразователи перемещения с распределенными параметрами» (1966 г.).

В это же время Л.Ф. Куликовский создает теоретические основы новой специальности «Информационно-измерительная техника», для которой он подготавливает и издает учебник «Автоматические информационные измерительные приборы» (1966 г.).

В этот период в научном направлении Л.Ф. Куликовского наметился переход от разработки отдельных измерительных приборов к созданию информационно-измерительных систем, которые внедрялись в различных отраслях промышленности – нефтяной, нефтеперерабатывающей, приборостроительной. Под его руководством создается система контроля и управления процессом бурения, которая принимается Министерством нефтяной промышленности к серийному производству. На основе этих научных разработок Лонгин Францевич подготавливает и издает монографию «Информационно-измерительная техника для управления процессом бурения» (1969 г.).

Наряду с разработкой информационных систем Л.Ф. Куликовским проводятся исследования в области создания малых информационно-измерительных машин (МИИМ) для математической обработки результатов измерения с целью сжатия и предварительной обработки измерительной информации перед ее дальнейшим использованием и хранением. Разработанные и внедренные устройства описаны им в книге «Автоматические измерительные приборы с устройствами для выполнения математических операций» (1970 г.).

В области разработки измерительных преобразователей в этот же период Л.Ф. Куликовский обосновал принципиально новое направление – создание функциональных преобразователей, а также преобразователей с изменяемыми характеристиками. Некоторые результаты этих работ представлены им в книге «Трансформаторные функциональные преобразователи с профилированными вторичными контурами» (1971 г.).

Наряду с плодотворной научной деятельностью Л.Ф. Куликовский постоянно занимается совершенствованием системы подготовки инженеров в области информационной техники и приборостроения. На смену специальности «Электроизмерительная техника» по его инициативе приходит специальность «Информационно-измерительная техника». Предвидя развитие автоматизированных систем управления, Лонгин Францевич закладывает основы новой специально-

сти «Автоматизация и механизация процессов обработки и выдачи информации». При этом кафедра, возглавляемая Л.Ф. Куликовским, в 70-х годах стала головной в стране по разработке учебно-методического обеспечения, а сам Лонгин Францевич в те же годы являлся председателем научно-методической комиссии Минвуза по этой специальности.

На базе предметной комиссии по специальности «Автоматизация и механизация процессов обработки и выдачи информации» в 1975 г. была создана кафедра «Информационная техника» (впоследствии получившая название «Информационные технологии»). Эту кафедру тогда же и возглавил заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д. т. н., проф. Л.Ф. Куликовский.

Лонгин Францевич всегда занимал активную жизненную позицию, принимал активное участие в общественной жизни. Длительное время он был председателем Поволжского совета по координации и планированию научно-исследовательских работ в области естественных и технических наук в Поволжском экономическом районе. На этом посту он внес большой вклад в становление и развитие научных исследований в вузах Поволжья.

Результаты научных исследований Л.Ф. Куликовского опубликованы в 14 монографиях и более чем в 300 научных работах, из которых свыше 120 авторских свидетельств, первое из них – «Устройство для измерения малых электрических величин при помощи гальванометра» (1935 г.).

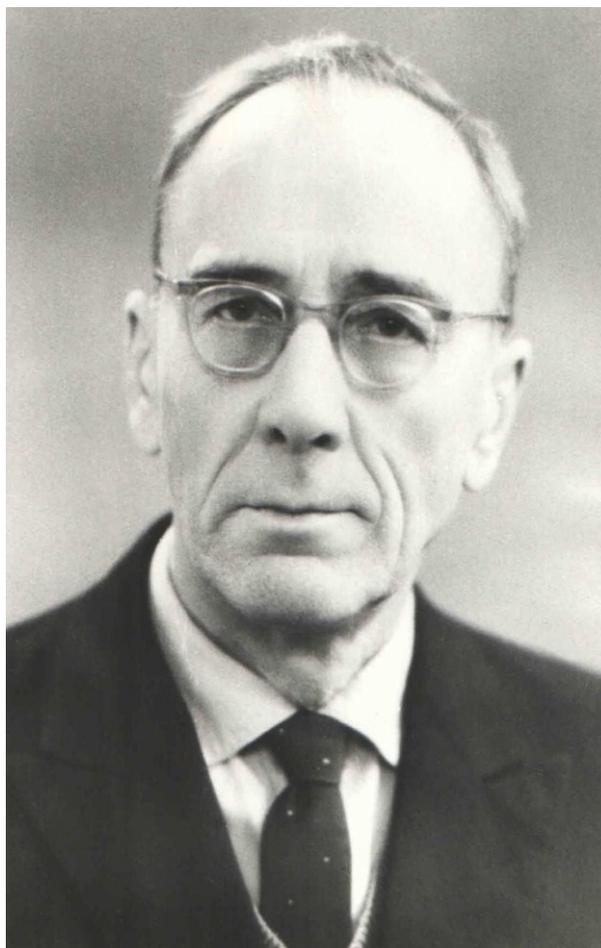
Оригинальные приборы, разработанные им и под его руководством, экспонировались на ВДНХ и международных выставках в Рангуне, Монреале, Будапеште, Осаке, за что сотрудники кафедры были награждены 47 медалями. Сам Л.Ф. Куликовский награжден тремя золотыми, одной серебряной медалью и тремя дипломами почета.

Большое внимание Лонгин Францевич уделял подготовке научных кадров. Более 300 кандидатов и 30 докторов наук прошли его научную школу.

65 лет его созидательного, творческого труда, из которых 57 лет – в высшей школе, отмечены двумя орденами Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, шестью медалями, нагрудными знаками Наркомнефти, Минвуза СССР, РСФСР, почетным званием «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», многими почетными грамотами. Но не менее весомой наградой является память о большом ученом, талантливом изобретателе, выдающемся педагоге и прекрасном человеке Лонгине Францевиче Куликовском в сердцах его многочисленных учеников, широкой научной общественности и всех, кто имел счастье знать его и работать с ним.

П.К. Ланге, О.Г. Корганова

**К 115-летию со дня рождения
Виталия Николаевича Никольского**



1904–1988

В истории Самарского государственного технического университета среди множества достойных внимания имен имя Виталия Николаевича Никольского сразу вызывает ассоциацию с понятием «первый». В.Н. Никольский учился в числе первых студентов Самарского энергетического института и стал одним из первых выпускников Средневолжского индустриального института имени В.В. Куйбышева, был одним из организаторов и первых преподавателей вуза и, наконец, стал первым деканом факультета автоматики и измерительной техники Куйбышевского индустриального института, который приступил к подготовке специалистов по новейшим направлениям науки и техники.

В феврале 1935 года В.Н. Никольский на отлично защитил дипломный проект по теме «Разработка и сравнение современных систем электрического привода продольно-строгального станка» с присвоением ему квалификации инженера-

электрика. В октябре 1939 года Виталий Николаевич переведен на должность старшего преподавателя кафедры «Электрические машины и электрические станции». В период Великой Отечественной войны В.Н. Никольский продолжал вести учебный процесс в должности старшего преподавателя, читал курсы электрических машин, электрических измерений, ионной аппаратуры и принимал участие в выполнении заданий Государственного комитета обороны по отработке новых конструкций боеприпасов. В 1948 году с прибытием в Куйбышевский индустриальный институт доктора технических наук профессора С.И. Тельного, крупного ученого-исследователя по теории электрической дуги и регулированию режимов работы дуговых электропечей, Виталий Николаевич переходит старшим преподавателем на кафедру теоретической и общей электротехники. Он сдает все экзамены кандидатского минимума и работает над диссертацией под руководством профессора Тельного.

В 1953 году, после назначения на должность заместителя директора по научной работе Куйбышевского индустриального института доктора технических наук профессора Лонгина Францевича Куликовского, на энергетическом факультете им была организована кафедра автоматических и измерительных устройств. В.Н. Никольский, который имел уже достаточный опыт преподавания курса электрических измерений, осенью 1954 года переходит на должность старшего преподавателя вновь организованной кафедры. В декабре 1955 года состоялась защита диссертации В.Н. Никольского на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Исследование метода определения параметров электрической цепи трехфазной дуговой печи» (научный руководитель – д.т.н., профессор С.И. Тельный). Одним из результатов проведенных научных исследований стало получение им в июне 1956 г. авторского свидетельства на изобретение омметра переменного тока – прибора для измерения параметров электрической цепи трехфазной дуговой печи.

Остались позади более 30 лет непрерывной работы, накоплен практический опыт ведения лабораторных работ и чтения лекций по электротехническим дисциплинам, а Виталий Николаевич снова оказался на переднем крае. Он не был аспирантом или соискателем среди тех, кто составил ядро коллектива единомышленников Л.Ф. Куликовского, но стал его соратником в деле организации новых специальностей и кафедр целого факультета в течение многих лет.

Из деловых качеств Никольского коллеги всегда отмечали его исключительную аккуратность, исполнительность, широкий диапазон знаний, самостоятельность и большую инициативность. По воспоминаниям студентов к ним можно еще добавить необычайную скромность и доброжелательность интеллигентного человека в сочетании с высокой требовательностью к себе и окружающим. Его постоянное стремление быть в курсе новейших разработок в области техники и самому создавать что-то новое помогали в решении самых трудных вопросов в малознакомой тогда области – кибернетике. На кафедре, возглавляемой Л.Ф. Куликовским, Виталий Николаевич занимался исследованиями в области быстродействующих электромагнитов.

Небольшой, но высококвалифицированный коллектив кафедры «Автоматические и измерительные устройства» приложил много усилий к созданию современной учебной базы и начал профилировать студентов электротехнического факультета по направлениям измерительная техника, автоматика и автоматизация нефтехимической промышленности.

По инициативе Лонгина Францевича Куликовского приказом министра высшего и среднего специального образования РСФСР в 1959 году в Куйбышевском индустриальном институте был организован факультет «Автоматика и измерительная техника». С ноября 1959 года по ноябрь 1969 года В.Н. Никольский исполнял обязанности декана вновь организованного факультета.

Первый выпуск инженеров по профилирующим специальностям нового факультета состоялся в 1961 году в количестве 63 человек.

В ноябре 1969 года, когда факультет отметил свое десятилетие, на его 5 кафедрах обучались 1419 студентов по 7 специальностям.

С ноября 1959 по июль 1970 гг. В.Н. Никольский заведовал кафедрой «Автоматизация производственных процессов» (АПП). Кафедра приступила к подготовке инженеров по остродефицитной к тому времени специальности в области разработки и применения современных приборов и систем автоматизации в нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей и химической промышленности. На кафедре велась активная научно-исследовательская работа. Бронзовыми медалями ВДНХ были отмечены измерительные усилители и РН-метр в феврале 1965 года и в декабре 1967 года. На кафедре АПП был разработан принципиально новый способ построения автоматических стабилизаторов напряжения. К этому времени у Никольского опубликовано 14 научных трудов.

Заслуги Виталия Николаевича Никольского отмечены орденом «Знак Почета» и многими медалями. Имя Виталия Николаевича Никольского, замечательного педагога и человека, навечно вписано в историю Самарского государственного технического университета и всегда будет напоминать о тех, кому мы обязаны созданием одного из крупнейших вузов России.

А.А. Барсова

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В приоритетном порядке рассматриваются материалы докторских и кандидатских диссертаций.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

<http://vestnik-teh.samgtu.ru>

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи можно передать ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала