

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2/2022

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
В. А. Левин, академик РАН,
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
Е. А. Федосов, академик РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишнеvский, д-р техн. наук,
А. О. Калашников, д-р техн. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
Н. В. Кузнецов, д-р физ.-мат. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
В. В. Кульба, д-р техн. наук,
А. А. Лазарев, д-р физ.-мат. наук,
В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
В. Е. Лепский, д-р психол. наук,
Н. Е. Максимова, канд. техн. наук
(ответственный секретарь),
А. С. Мандель, д-р техн. наук,
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук,
А. И. Михальский, д-р биол. наук,
Д. А. Новиков, чл.-корр. РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашченко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
П. Ю. Чеботарёв, д-р физ.-мат. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р физ.-мат. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
Саратов – В. А. Твердохлебов, д-р техн. наук,
Тамбов – М. Н. Краснянский, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук,
Челябинск – О. В. Логиновский, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, Academician of RAS¹,
I. A. Kalyaev, Academician of RAS,
V. A. Levin, Academician of RAS,
N. A. Makhutov, Corr. Member of RAS,
A. F. Rezchikov, Corr. Member of RAS,
S. N. Vassilyev, Academician of RAS

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanas'ev, Dr. Sci. (Tech.),
F. T. Aleskerov, Dr. Sci. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, Dr. Sci. (Tech.),
V. N. Burkov, Dr. Sci. (Tech.),
P. Yu. Chebotarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
A. O. Kalashnikov, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Klochkov, Dr. Sci. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Kulba, D. Sc. (Tech.),
N. V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),
V. E. Lepskiy, D. Sc. (Phych.),
A. S. Mandel, Dr. Sci. (Tech.),
N. E. Maximova, Cand. Sci. (Tech),
Executive Editor-in-Chief,
R. V. Meshcheryakov, Dr. Sci. (Tech.),
A. I. Michalski, Dr. Sci. (Biol.),
D. A. Novikov, Corr. Member of RAS,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, Dr. Sci. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, Dr. Sci. (Tech.),
L. B. Rapoport, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, Dr. Sci. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, Dr. Sci. (Tech.),
A. D. Tsvirkun, Dr. Sci. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Tech.),
I. B. Yadykin, Dr. Sci. (Tech)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Chelyabinsk – O. V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Tech.),
Kursk – S. G. Emelyanov, Dr. Sci. (Tech.),
Lipetsk – A. K. Pogodaev, Dr. Sci. (Tech.),
Perm – V. Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Tech.),
Rostov-on-Don – G. A. Ougolnitsky,
Dr. Sci. (Tech.),
Samara – M. I. Geraskin, Dr. Sci. (Econ.),
Saratov – V. A. Tverdokhlebov, Dr. Sci. (Tech.),
Tambov – M. N. Krasnyanskiy, Dr. Sci. (Tech.),
Ufa – B. G. Ilyasov, Dr. Sci. (Tech.),
Vladivostok – O. V. Abramov, Dr. Sci. (Tech.),
Volgograd – A. A. Voronin, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Voronezh – S. A. Barkalov, Dr. Sci. (Tech.)

¹Russian Academy of Sciences.



CONTROL SCIENCES
Научно-технический
журнал

6 номеров в год
ISSN 1819-3161 (Print)
ISSN 2712-8687 (Online)
Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН
Д.А. Новиков

Заместитель главного редактора
Ф.Ф. Пащенко

Ответственный секретарь
Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор
Л.В. Петракова

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410

Тел./факс (495) 198-17-20, доб. 1410

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>
<http://controlsciences.org>

Опубликовано: 28 апреля 2022 г.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.
выдано Министерством Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС 77-80482 от 17 февраля 2021 г.
выдано Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
На сайте Научной электронной
библиотеки (www.elibrary.ru) доступны
полные тексты статей.

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2.2022

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Шихалев Д.В. Проблемы управления системой обеспечения
пожарной безопасности объекта. Ч.2. Методы мониторинга3

Управление в социально-экономических системах

Стенников В.А., Хамисов О.В., Пеньковский А.В.
Математическая модель управления регулируемым
монопольным рынком централизованного теплоснабжения12

Управление техническими системами и технологическими процессами

Агеев А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Арбитражный подход
к управлению избыточностью комплекса бортового
оборудования на основе супервизоров конфигураций24

Алхелу М., Вассуф Я., Серебрянный В.В. и др. Адаптивное
управление компромиссом между управляемостью и комфортом
в модели типа «четверть автомобиля»36



CONTROL SCIENCES
Scientific Technical
Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161 (Print)

ISSN 2712-8687 (Online)

Published since 2003

FOUNDER and PUBLISHER

V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D.A. Novikov, Corr. Member of RAS

Deputy Editor-in-Chief

F.F. Pashchenko

Executive Editor-in-Chief

N.E. Maximova

Editor

L.V. Petrakova

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,
Moscow 117997, Russia

☎/📠 +7(495) 198-17-20, ext. 1410

✉ pu@ipu.ru

URL: <http://pu.mtas.ru>

<http://controlsciences.org>

Published: April 28, 2022

Registration certificate of

ПИ № ФС 77-49203 от 30 March 2012

issued by the Ministry of Press,

Broadcasting, and Mass Media

of the Russian Federation

Registration certificate of

Эл № ФС 77-80482 of 17 February 2021

issued by the Federal Service

for Supervision of Communications,

Information Technology, and Mass Media

The Journal is indexed in RSCI (Russian

Science Citation Index) on the platform

Web of Science and in the list of peer-

reviewed scientific publications of HAC

On the website of the Scientific electronic

library (www.elibrary.ru) full texts of

articles are available

© V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

2.2022

CONTENTS

Surveys

Shikhalev, D.V. Problems of Managing the Fire Safety System

of a Facility. Part II: Monitoring Methods 3

Control in Social and Economic Systems

Stennikov, V.A., Khamisov, O.V., and Penkovskii, A.V.

A Mathematical Model of Managing a Regulated Monopoly

District Heating Market 12

Control of Technical Systems and Industrial Processes

Ageev, A.M., Bukov, V.N., and Shurman, V.A.

Redundancy Management of Onboard Equipment: An Arbitration

Approach Based on Configuration Supervisors 24

Alhelou, M., Wassouf, Y., Serebrenny, V.V., et al.

The Handling-Comfort Trade-Off in a Quarter-Car System:

Automatic Adaptive Management via Active Disturbance

Rejection Control 36

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА.

Ч.2. Методы мониторинга

Д.В. Шихалев

Аннотация. Приводятся результаты обзора способов мониторинга пожарной безопасности объекта, а также методов оценки состояния социально-экономических систем, нашедших свое применение в области пожарной безопасности. Выявлено, что ни в одной существующей системе мониторинга (в области пожарной безопасности) не применялась процедура поддержки принятия решений по корректировке значения параметра (или их совокупности), имеющего отклонение от заданного диапазона. Подавляющая часть систем мониторинга в области пожарной безопасности сводится к оценке состояния систем противопожарной защиты и передаче данных об их срабатывании в оперативные службы. Таким образом, существующий мониторинг пожарной безопасности упрощен до уровня оценки состояния систем пожарной автоматики, которые, безусловно, не могут отразить состояния пожарной безопасности объекта. Установлено, что одним из наиболее развитых методов оценки состояния сложной социально-экономической системы является процедура комплексного оценивания, применяемая в теории активных систем. Показаны области применения данного метода в задачах оценки уровня пожарной безопасности. Выявлены существующие противоречия в области управления системой обеспечения пожарной безопасности и представлены некоторые способы их разрешения.

Ключевые слова: пожарная безопасность, управление, оценка состояния объекта управления, система обеспечения пожарной безопасности, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Как показано в первой части обзора [1], в настоящее время система обеспечения пожарной безопасности как таковая отсутствует в понятии как объект управления, так как эта процедура не описана, нет критериев оценки эффективности системы обеспечения пожарной безопасности, руководитель объекта фактически не понимает, чем ему нужно управлять. Кроме того, несмотря на весь арсенал подходов в области оценки безопасности, для руководителя эти методы в прямой постановке трудно реализуемы и самостоятельно он их применить не сможет, так как это требует глубоких знаний предмета оценки и наличия соответствующей квалификации и инструментария (компьютерных программ). Таким образом, в настоящее время руководитель объекта не в состоянии собственными

силами, без привлечения профильных специалистов оценить состояние безопасности его организации (объекта).

Одним из способов оценки текущего состояния безопасности объекта, в том числе и пожарной, является мониторинг, который определяется как система непрерывной оценки, контроля и управления состоянием объекта в зависимости от складывающейся внешней обстановки [2]. Системы мониторинга широко распространены в различных сферах человеческой деятельности [3–7], в том числе и в области обеспечения комплексной безопасности зданий [8, 9].

Вторая и заключительная часть обзора посвящена рассмотрению способов мониторинга пожарной безопасности объекта, а также методам оценки состояния социально-экономических систем, которые применяются для оценки уровня пожарной безопасности.

1. СПОСОБЫ МОНИТОРИНГА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

Пожарный мониторинг как таковой получил развитие относительно недавно. Впервые проработанные решения в этой области связаны с появлением программно-аппаратного комплекса (ПАК) «Стрелец-Мониторинг» – комплексной системы мониторинга и оповещения о чрезвычайной ситуации. В работе [10] предложена концепция построения системы радиоканального мониторинга пожарной безопасности объекта. Обосновано применение радиоканалов, показано их преимущество перед традиционными линиями телефонной связи. Отмечается, что основной причиной тяжелых последствий (массовая гибель людей) являлась неспособность имеющихся систем обнаружения пожара передавать сигналы о возгорании непосредственно в пожарные подразделения, что приводило к большой задержке вызова. Изложенные в работе требования к системе мониторинга относятся к надежности, помехоустойчивости и другим техническим параметрам системы. Однако отсутствует информация, по каким параметрам должен осуществляться мониторинг. Затронуты проблемы пожарного мониторинга в Российской Федерации, которые касаются только лишь юридических аспектов мониторинга, а не его вида, задач или иных технических характеристик. Таким образом, по существу, предложенная система мониторинга сводится к системе передачи информации о срабатывании элемента (элементов) автоматической пожарной сигнализации в единую дежурно-диспетчерскую службу и высылки на основании этого сигнала пожарно-спасательных подразделений.

Еще одной вновь разрабатываемой системой является национальная единая аналитическая система контроля пожарной безопасности в зданиях «Прометей» [11]. Из информации, представленной на официальном сайте, следует, что система предназначена для дистанционного контроля систем противопожарной защиты в здании, контроля их технического обслуживания, ведения баз данных всех участников рынка противопожарной продукции. Предполагается, что «Прометей» будет формировать рейтинг пожарной безопасности организации. Исходя из текущих функциональных возможностей системы, рейтинг будет сформирован на основе оценки состояния работоспособности и технического обслуживания систем противопожарной защиты. Однако судить о пожарной безопасности здания на основе данного показателя

оприметчиво, так как пожарная безопасность и ее состояние – понятия намного более глубокие и обширные. Как было показано в первой части обзора [1], для оценки состояния применяются детально проработанные с научной точки зрения методы. По большому счету, рассматриваемая система является более высоким уровнем развития ПАК «Стрелец-Мониторинг», но по существу сводится к контролю и передаче информации о состоянии систем противопожарной защиты и как таковым мониторингом называться не может, так как в ней отсутствуют способы управления контролируемыми параметрами в режиме реального времени. В целом, мониторингу пожарной безопасности ставится в соответствие контроль работоспособности систем противопожарной защиты; такой подход является достаточно поверхностным.

Наиболее проработанной в настоящее время является область мониторинга пожара. В работе [12] приведены модели дистанционного мониторинга пожара с оценкой состояния пожара, т. е. этапа, когда в здании уже возник пожар и ставится задача получения данных о его развитии с целью выработки управленческих решений, направленных на обеспечение безопасности деятельности пожарно-спасательных подразделений. В указанном исследовании разработан метод поддержки принятия решений на основе мониторинга пожара, представляющий собой многоуровневую процедуру анализа и ранжирования решений по предпочтительности. Несмотря на всю важность решенной задачи, ее применение, безусловно, полезно на этапе, когда уже возник пожар, а для цели настоящего исследования такая постановка не применима.

Еще одним примером является разработанный логико-вероятностный подход к мониторингу состояния потенциально опасного объекта, в частности для моделирования сценариев развития аварии [13]. Введено определение мониторинга потенциально опасного объекта – постоянный сбор информации, наблюдение и контроль за объектом, включающий в себя процедуры анализа риска, измерения параметров технологического процесса на объектах, выбросов вредных веществ, состояния окружающей среды на прилегающих к объекту территориях. Мониторинг строится на взаимодействии двух блоков: информационного (сбор, обработка и представление информации) и экспертного (обработка, моделирование/прогнозирование сценариев и оценка их результатов). В качестве показателя мониторинга принимается набор параметров, определяющих безопасность объекта и описывающих текущее состояние системы в заданный момент времени. Несмотря на актуальность данной



работы, ее недостатками являются слишком обобщенный и не детализированный набор параметров мониторинга, а также отсутствие информации об источниках получения значений таких параметров.

Кроме того, развиваются методы контроля состояния пожароопасной обстановки в составе автоматической системы мониторинга окружающей среды [14]. Предложен подход к интеграции датчиков пожарной сигнализации и сенсоров сверхраннего обнаружения для контроля уровня загазованности среды помещений. В качестве объекта мониторинга выбраны следующие параметры: температура среды в зоне контроля, уровень монооксида углерода (угарный газ) и задымленность. Результаты апробации показали повышение точности обнаружения пожара на 25 %, а в целом надежность системы возросла на 37 %. Несмотря на положительные результаты апробации, исследование скорее посвящено решению инженерной задачи, а не научной. Ожидается, что увеличение средств контроля приведет к повышению эффективности обнаружения пожара, а параметры мониторинга известны специалистам в области обеспечения пожарной безопасности.

В тоже время, существуют разработки системы мониторинга при возникновении и развитии пожара, предназначенной для оценки безопасности пожарно-спасательных подразделений во время работы на объекте, построенном с применением стальных ферм [15]. Мониторинг осуществляется по показателю «комплексный индекс обрушения», который характеризует вероятность полного разрушения конструкции при разрушении одного из ее элементов. Предлагается устанавливать датчики контроля температуры не на каждый элемент конструкции, а лишь на те, чья целостность наиболее важна для устойчивости конструкции. Расчет значений показателя, определяющего важность такого элемента конструкции для ее общей устойчивости, производится заранее. Затем, при возникновении пожара, датчики передают параметры среды и оценивается уровень опасности обрушения. Компьютерное моделирование показало возможность предсказания разрушения перекрытия на 180 с раньше наступления этого события. Этого должно быть достаточно для того, чтобы звенья газодымозащитной службы покинули опасную область. Рассматриваемый подход представляет ценность для развития области пожарного мониторинга, однако только для этапа, когда пожар уже произошел, так же, как и ранее рассмотренный подход [12].

Активно внедряются в область мониторинга и современные технологии. Например, уже существует концепция мониторинга системы пожаротушения на базе технологий интернета вещей

(IoT) [16]. С помощью различных сенсоров система контролирует актуальную информацию о давлении в системе пожаротушения, температуре и влажности окружающей среды, напряжении электрооборудования, положении управляющих клапанов, сигнал о срабатывании. Предлагается модель раннего обнаружения пожара на основе нейронной сети, однако принципы ее работы не приводятся. Кроме того, введена пятибалльная оценка уровня пожарной безопасности здания, при этом данные о способе проведения такой оценки также не приводятся. Исходя из параметров мониторинга предполагаем, что уровень безопасности оценивается на основе текущего состояния автоматической системы пожаротушения. В целом, в работе представлен интересный подход, который требует развития. Как и в ранее рассмотренных работах, мониторинг осуществляется в отношении технических элементов систем противопожарной защиты.

В области государственного регулирования мониторинга при пожарах и чрезвычайных ситуациях существует ряд нормативных актов и документов. Например, концепция государственной системы мониторинга критически важных и потенциально опасных объектов и опасных грузов [17]. Объектом мониторинга является состояние защищенности объектов и грузов. Данная концепция не выделяет каких-либо конкретных параметров для контроля в ходе мониторинга, определены лишь области контроля. Отличительной особенностью данной концепции является наличие автоматизированной поддержки принятия решений в целях минимизации последствий чрезвычайной ситуации. В целом, данная концепция достаточно подробно описывает функции, состав и порядок функционирования системы мониторинга. Несмотря на перспективность направления, серьезного развития оно не получило и осталось на уровне концепции.

В свою очередь, существует государственный стандарт [8], посвященный основам и принципам построения структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС). Определены ее функции, состав, порядок информационного сопряжения и другие аспекты. Система проектируется для потенциально опасных и критически важных объектов. Среди прочего, СМИС должна обеспечивать прогнозирование и предупреждение аварийных ситуаций путем контроля и определения отклонений их текущих значений от установленных. В качестве параметров мониторинга выступают следующие факторы [8]:

- возникновение пожара;
- нарушения в системе тепло- и водоснабжения, отопления;

- нарушения в подаче электроэнергии;
- нарушения в подаче газа;
- отказ в работе лифтового оборудования;
- несанкционированное проникновение в помещения;
- повышение уровня радиации, ПДК аварийных химически опасных веществ и др.;
- затопление помещений, дренажных систем и технологических приямков;
- отклонения технологических процессов от нормативных параметров;
- изменение состояния конструктивных элементов здания;
- состояние систем противопожарной и противоаварийной защиты;
- состояние инженерной защиты;
- состояние участков, характеризующихся повышенной вероятностью возникновения опасных природных процессов (оползни, лавины и др.).

Структурно СМИС состоит из трех подсистем: сбора данных и передачи сообщений, связи и управления в кризисных ситуациях, мониторинга инженерных конструкций. Функционирование СМИС предусмотрено следующим образом. Система в непрерывном режиме осуществляет контроль факторов, влияющих на обеспечение безопасности, и при их отклонении от нормы передает информацию диспетчеру для оповещения и принятия соответствующего решения. В рамках данной системы отсутствуют какие-либо модули поддержки принятия решений, которые предоставляли бы ЛПП набор альтернативных решений. В целом, функция СМИС сводится к оповещению об изменении состояния объекта управления.

Документ [9] определяет и регулирует построение системы мониторинга автоматических систем противопожарной защиты (СМА СПЗ) и вывод сигналов на пульт централизованного наблюдения «01» и «112». Предписывается, что СМА СПЗ должна выполнять сбор данных о пожарах (авариях) и стихийных бедствиях, производить контроль надежности и работоспособности систем противопожарной защиты. Система осуществляет мониторинг по пожарным (пожар, тревога и др.) и сервисным (неисправность, снятие шлейфа и др.) извещениям. Как и в ранее рассмотренной системе (СМИС), здесь отсутствуют какие-либо меры по поддержке принятия решений в ходе мониторинга. Функции системы сводятся к передаче сообщений в организацию, осуществляющую мониторинг.

Рассмотрев системы мониторинга, приходим к выводу, что они направлены по своей сути на передачу информации о состоянии систем противопо-

пожарной защиты в организацию, осуществляющую мониторинг (пожарно-спасательную часть). Кроме того, ряд параметров просто контролируется, а их значения не влияют на процесс управления состоянием объекта.

Возникновение данной ситуации можно объяснить наличием двух точек зрения по данному вопросу, сложившихся в конце 1980-х годов [18] у ученых в области окружающей среды. По мнению академика РАН Ю.А. Израэля, мониторинг – «система наблюдений, позволяющая выделить изменение состояния под влиянием человеческой деятельности, которая включает в себя наблюдение, оценку и прогноз состояния среды и не включает управление качеством такой среды и человеческой деятельности» [19]. Его оппонентом выступал академик АН СССР И.П. Герасимов, который определял мониторинг как «систему контроля, оценивания и управления окружающей средой, которые должны быть целеустремлены, взаимосвязаны и эффективны» [20]. При этом эффективность не нацеленного на управление мониторинга может привести к ряду проблем (избыточность/недостаточность информации, ее невостребованность и др.). С точки зрения обеспечения пожарной безопасности, в настоящей работе принимается позиция академика И.П. Герасимова, так как первоочередной задачей при управлении пожарной безопасностью (в целом любой организационной системой) является мониторинг текущего состояния системы, т. е. понимание той отправной точки, с которой осуществляется управление.

Проведенный анализ способов мониторинга пожарной безопасности объекта показал, что в настоящее время область мониторинга состояния пожарной безопасности находится в начале своего развития. Как правило, осуществляется мониторинг состояния систем противопожарной защиты и передача данных об их срабатывании в оперативные службы. Это объясняется совокупностью следующих факторов: отсутствие показателя, который характеризовал бы состояние пожарной безопасности объекта и, как следствие, отсутствие технических решений, направленных на получение данных о значениях контролируемых параметров. При этом ни в одной из рассмотренных систем не осуществлялся мониторинг организационных мероприятий (соблюдения тех или иных требований пожарной безопасности), а как показано в первой части обзора [1], это является одной из наиболее частых причин возникновения пожара. Текущее развитие области мониторинга пожарной безопасности объекта требует наличия большего количества параметров, чем исправность систем противопо-



пожарной защиты, так как они предназначены для ситуаций, когда уже произошел пожар. Кроме того, ни в одной системе мониторинга (в области пожарной безопасности) не применялась процедура поддержки принятия решений по корректировке значения параметра (или их совокупности), имеющего отклонение от заданного диапазона.

На основании изложенных выводов представляется целесообразным конкретизировать термин «мониторинг» в отношении пожарной безопасности объекта. Введем следующее определение. Мониторинг состояния пожарной безопасности объекта – регулярная целенаправленная деятельность, включающая в себя оценку состояния пожарной безопасности объекта защиты на основе набора факторов (в том числе организационно-технические меры), характеризующих такое состояние, а также его контроль путем определения отклонений значений параметров от заданного диапазона и принятие решений в случае возникновения отклонения. Таким образом, одной из актуальных задач является выделение множества факторов, определяющих в своей основе состояние пожарной безопасности, установление взаимосвязи между такими факторами и степени их влияния на состояние объекта в целом.

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СФЕРЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассмотрим существующие методы оценки состояния социально-экономических систем. Для начала приведем ряд терминов.

Пожарная безопасность – состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара¹.

Требования пожарной безопасности – специальные условия социального и (или) технического характера, установленные в целях обеспечения пожарной безопасности федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации, а также нормативными документами по пожарной безопасности².

Меры пожарной безопасности – действия по обеспечению пожарной безопасности, в том числе

по выполнению требований пожарной безопасности².

Профилактика пожаров – совокупность превентивных мер, направленных на исключение возможности возникновения пожаров и ограничение их последствий².

Таким образом, в настоящее время отсутствует термин, характеризующий состояние пожарной безопасности. Для этого определим его следующим образом. Состояние пожарной безопасности объекта – множество факторов организационного, социального и технического характера, определяющих объект.

Состояние большинства систем в первом приближении можно описать набором факторов (параметров), влияющих на их функционирование. Задача оценки состояния системы сводится к определению факторов (параметров), влияющих на функционирование системы, установлению функциональной взаимосвязи между ними, получению качественных или количественных метрик данных факторов. «Оценка» в отношении системы может использоваться как процесс или как результат измерения [21]. Исходя из цели настоящего исследования, рассматриваем оценку как результат измерения текущего состояния системы. Рассмотрим ряд работ, посвященных оценке состояния.

Ранее были рассмотрены механизмы оценки безопасности потенциально опасных объектов, где для этой задачи применяется теория активных систем. Рассмотрим данную технологию более подробно.

В основе комплексного оценивания сложных социально-экономических систем [22] лежит иерархическое представление дерева целей, а основная идея заключается в применении метода дихотомии [23] к дезагрегированию вершин дерева, что позволяет проводить свертку пар вершин по иерархии вверх. В подходе рассматриваются как количественные (измеряемые/рассчитываемые) показатели, так и качественные, определение которых осуществляется экспертным путем.

Алгоритм заключается в следующем:

Шаг 1. Определение n направлений оценивания состояния объекта.

Шаг 2. Разбиение n направлений оценивания состояния объекта на две подгруппы: подгруппа 1, оценки по которой могут быть определены объективным путем (измерены, рассчитаны и т. д.), и подгруппа 2, для которой оценки определяются экспертным путем.

Шаг 3. Формирование единой балльной шкалы оценок для всех n направлений.

Шаг 4. Определение локальных оценок направлений в подгруппе 2.

¹ Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ.

² Федеральный закон «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 N 69-ФЗ.

Шаг 5. Определение показателей, характеризующих объект по каждому направлению оценки в подгруппе 2.

Шаг 6. Разработка шкалы пересчета показателей, определенных на шаге 5, в локальные балльные оценки.

Шаг 7. Определение степени важности показателей, выделенных на шаге 6.

Шаг 8. Измерение или расчет показателей подгруппы 2 по шагам 5, 7.

Шаг 9. Пересчет показателей в подгруппе 2 в локальные балльные оценки.

Шаг 10. Определение локальных оценок объекта по направлениям подгруппы 1.

Шаг 11. Определение пары направлений, локальные оценки по которым будут сворачиваться в обобщенную оценку.

Шаг 12. Формирование матриц свертки попарного сравнения локальных и обобщенных оценок.

Шаг 13. Формирование комплексной оценки объекта.

В результате выполнения данного алгоритма можно получить комплексную оценку сложной социально-экономической системы (организации, проекта и т. д.). В ряде работ данный метод применялся для решения задач пожарной безопасности.

Например, разработаны модели и механизмы управления пожарной безопасностью региона на основе теории активных систем с применением метода комплексного оценивания [24]. Пожарная безопасность региона характеризуется тремя критериями: количество травмированных и погибших при пожарах, а также размер материального ущерба. Оценка этих критериев производилась по четырехбалльной шкале. Кроме того, проведена оценка уровня пожарной безопасности Воронежской области, в результате чего установлено, что уровень пожарной безопасности снизился на 3 % в период с 1996 по 2001 г. Для его повышения разработана соответствующая программа.

В развитие данного подхода проведено исследование, посвященное разработке моделей и алгоритмов управления пожарной безопасностью на основе программ регионального развития [25]. Как и в предыдущем исследовании, рассматриваются показатели, характеризующие пожарную безопасность региона, с добавлением показателя «количество пожаров», а затем, на следующем шаге, он исключается как превышающий допустимую связь с другими показателями. Очевидно, что количество пожаров является основным показателем, который влияет на все остальные (количество погибших, травмированных и сумма ущерба).

В рассмотренных подходах [24, 25] предпринята попытка оценки уровня пожарной безопасности, однако полученные результаты подвергаются сомнению, так как оценить пожарную безопасность путем учета количества погибших и травмированных, а также материального ущерба является неприемлемым и достаточно грубым. С помощью данных показателей возможно в первом приближении оценить те или иные меры в отношении пожарной безопасности, но не ее как таковую.

Рассмотрев методы оценки состояния социально-экономических систем, делаем следующие выводы. На текущем этапе одним из наиболее разработанных методов оценки является процедура комплексного оценивания, предложенная профессором В.Н. Бурковым [22], а сам метод по своему содержанию достаточно эффективный и может быть адаптирован для оценки состояния системы пожарной безопасности объекта. В тоже время, данный метод при росте количества показателей, характеризующих состояние, или изменении их структурной взаимосвязи, требует проведения повторной процедуры получения оценки, в том числе проведения экспертного оценивания. Имеющиеся исследования по применению данного подхода к задаче оценки уровня пожарной безопасности неприменимы для оценки состояния пожарной безопасности объекта. Таким образом, в настоящее время методы оценки текущего состояния пожарной безопасности объекта защиты требуют развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение обзора способов мониторинга пожарной безопасности объекта, а также методов оценки состояния социально-экономических систем, применяющихся в сфере пожарной безопасности, сформулируем следующие выводы:

- Результаты анализа способов мониторинга пожарной безопасности объекта показали, что в настоящее время область мониторинга состояния пожарной безопасности находится в начале своего развития. Как правило, осуществляется мониторинг состояния систем противопожарной защиты и передача данных об их срабатывании в оперативные службы. Это объясняется совокупностью следующих факторов: отсутствие показателя, который характеризовал бы состояние пожарной безопасности объекта и, как следствие, отсутствие технических решений, направленных на получение данных о контролируемых параметрах. При этом ни в одной из рассмотренных систем не осуществлялся



мониторинг организационных мероприятий (соблюдения тех или иных требований пожарной безопасности), которые являются одними из наиболее частых причин возникновения пожара. Текущее развитие области мониторинга пожарной безопасности объекта требует наличия большего количества параметров, чем исправность систем противопожарной защиты, так как они предназначены для ситуаций, когда уже произошел пожар. Кроме того, ни в одной системе мониторинга (в области пожарной безопасности) не применялась процедура поддержки принятия решений по корректировке параметра (или их совокупности), имеющего отклонение от заданного диапазона.

- В настоящее время одним из наиболее разработанных методов оценки состояния сложной социально-экономической системы является процедура комплексного оценивания, предложенная профессором В.Н. Бурковым, а сам метод по своему содержанию достаточно эффективный и может быть адаптирован для оценки состояния системы пожарной безопасности объекта. В тоже время, данный метод при росте количества показателей, характеризующих состояние, или изменениях их структурной взаимосвязи требует проведения повторной процедуры ее получения, в том числе экспертного оценивания. При этом существующие исследования, в которых данный метод применялся к задаче оценки уровня пожарной безопасности, выполнены на уровне региона, а состав показателей, положенных в основу такой оценки, является весьма дискуссионным. Следовательно, методы оценки текущего уровня (состояния) пожарной безопасности объекта защиты требуют развития.

Подводя итоги рассмотрения вопросов управления системой обеспечения пожарной безопасности, отметим, что данная область исследований в настоящее время столкнулась с рядом серьезных проблем и противоречий, которые можно охарактеризовать следующим образом:

- На руководителя объекта возложена обязанность по обеспечению пожарной безопасности (управлению системой обеспечения пожарной безопасности) и предусмотрена уголовная ответственность за несоблюдение правил безопасности, однако каких-либо методов и алгоритмов управления такой системой не представлено.

- Усилиями сообщества инженеров и ученых разработано огромное количество методов оценки пожарной безопасности объекта, однако уровень их сложности не позволяет руководителю объекта применить их в повседневной деятельности (без соответствующей профессиональной подготовки),

оценивать текущее состояние системы управления и принимать управленческие решения.

- Зачастую исследования в области системы обеспечения пожарной безопасности сосредоточены на стратегических уровнях (регион, государство), однако на базовом уровне объекта все еще отсутствуют технологии постановки и решения задач управления системой обеспечения пожарной безопасности как это, например, показано в работе [21].

По мнению автора настоящей публикации, отправной точкой решения вышеизложенных проблем и противоречий является набор следующих задач:

- формулировка концепции состояний системы обеспечения пожарной безопасности объекта на различных этапах ее функционирования,

- разработка методологии оценки состояния системы обеспечения пожарной безопасности объекта на различных этапах деятельности объекта,

- разработка методов, моделей и алгоритмов управления состоянием системы обеспечения пожарной безопасности объекта на различных этапах функционирования объекта,

- разработка методов поддержки принятия решений руководителем объекта по управлению системой обеспечения пожарной безопасности,

- разработка информационно-аналитической системы поддержки управления системой обеспечения пожарной безопасности.

Данные задачи должны быть решены таким образом, чтобы обеспечить их применение в режиме реального времени.

Автор глубоко признателен рецензенту статьи за ценные советы по изложению материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шихалев Д.В. Проблемы управления системой обеспечения пожарной безопасности объекта. Ч. 1. Методы оценки // Проблемы управления. – 2022. – № 1. – С. 3–18. [Shikhalev, D.V. Problems of Managing the Fire Safety System of a Facility. Part I: Assessment Methods // Control Sciences. – 2022. – No. 1. – P. 2–14.]
2. Гражданская защита: Мониторинг / под ред. В.А. Пучкова. – М.: ВНИИ ГОЧС, 2015. – 666 с. [Grazhdanskaya zashchita: Monitoring / pod red. V.A. Puchkova. – M.: VNIIGOCHS, 2015. – 666 s. (In Russian)]
3. Чепиков Н.А. Модель, метод и алгоритм обработки данных социально-гигиенического мониторинга автотранспортной сети для управления риском здоровью: дис. канд. техн. наук – К.: 2013. – 117 с. [Chepikov, N.A. Model, metod i algoritm obrabotki dannykh sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa avtotransportnoi seti dlya upravleniya riskom zdorov'yu (Model, method and algorithm for data processing of social and hygienic

- monitoring of the road transport network for health risk management) – Kursk: dissertation of the candidate of technical sciences, 2013. – 117 s. (In Russian)]
4. *Паращук Е.А.* Автоматизированная система мониторинга воздушной среды как информационная поддержка принятия управляющих решений: дис. канд. техн. наук – Б.: 2014. – 127 с. [*Parashchuk, E.A.* Avtomatizirovannaya sistema monitoringa vozduzhnoi sredy kak informatsionnaya podderzhka prinyatiya upravlyayushchikh reshenii (Automated air monitoring system as information support for making control decisions) – Belgorod: dissertation of the candidate of technical sciences, 2014. – 127 s. (In Russian)]
 5. *Норица В.А.* Информационная поддержка системы мониторинга материально-технической базы учреждения науки и образования: дис. канд. техн. наук – М.: 2013. – 121 с. [*Norica, V.A.* Informatsionnaya podderzhka sistemy monitoringa material'no-tekhnicheskoi bazy uchrezhdeniya nauki i obrazovaniya (Information support of the monitoring system of the material and technical base of the institution of science and education) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2013. – 121 s. (In Russian)]
 6. *Белов А.В.* Растровые модели и алгоритм визуализации пространственных данных в системах мониторинга природных и техногенных катастроф: дис. канд. техн. наук – М.: 2013. – 154 с. [*Belov, A.V.* Rastrovye modeli i algoritm vizualizatsii prostranstvennykh dannykh v sistemakh monitoringa prirodnykh i tekhnogennykh katastrof (Raster models and an algorithm for visualizing spatial data in monitoring systems for natural and man-made disasters) – Kursk: dissertation of the candidate of technical sciences, 2013. – 154 s. (In Russian)]
 7. *Миков Д.А.* Управление информационными рисками в системах дистанционного мониторинга состояния объекта: дис. ... канд. техн. наук – М.: 2018. – 159 с. [*Mikov, D.A.* Upravlenie informatsionnymi riskami v sistemakh distantsionnogo monitoringa sostoyaniya ob"ekta (Information risk management in systems for remote monitoring of the state of an object) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2018. – 159 s. (In Russian)]
 8. *ГОСТ Р 22.1.12-2005.* Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – Москва: ВНИИГОЧС, 2005. [*GOST R 22.1.12-2005.* Safety in emergencies. Structured system for monitoring and control of building and construction engineering equipment. General requirements. – Moscow: VNIIGOCHS, 2005. (In Russian)]
 9. *ГОСТ Р 56935-2016.* Производственные услуги. Услуги по построению системы мониторинга автоматических систем противопожарной защиты и вывода сигналов на пульт централизованного наблюдения «01» и «112». – Москва: НСОПБ, 2016. [*GOST R 56935-2016.* Production services. Services on construction of monitoring system of automatic fire protection systems and output signals on the panel «01» and «112» centralized monitoring. – Moscow: NSOPB, 2016. (In Russian)]
 10. *История создания и совершенствования беспроводных систем мониторинга / под ред. В.И. Зыкова.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 160 с. [*History of creation and improvement of wireless monitoring systems / pod red. V.I. Zikova.* – M.: State Fire Academy, 2016. – 160 s. (In Russian)]
 11. *Национальная единая аналитическая система контроля пожарной безопасности в зданиях «Прометей».* – URL: <https://fortespro.ru> (дата обращения: 14.01.2021) [*Natsional'naya edinaya analiticheskaya sistema kontrolya pozharnoi bezopasnosti v zdaniyakh «Prometei»*] (National unified analytical fire safety control system in buildings «Prometheus») – URL: <https://fortespro.ru>. (In Russian)]
 12. *Тараканов Д.В.* Многокритериальные модели и методы поддержки управления пожарными подразделениями на основе мониторинга динамики пожара в здании: дис. докт. техн. наук – М.: 2018. – 340 с. [*Tarakanov, D.V.* Mnogokriterial'nye modeli i metody podderzhki upravleniya pozharnymi podrazdeleniyami na osnove monitoringa dinamiki pozhara v zdanii (Multi-criteria models and methods for supporting the management of fire departments based on monitoring the dynamics of a fire in a building) – Moscow: dissertation of the doctor of technical sciences, 2018. – 340 s. (In Russian)]
 13. *Мосягин А.А.* Мониторинг потенциально опасных объектов на основе логико-вероятностного моделирования: дис. канд. техн. наук – М.: 2009. – 152 с. [*Mosyagin, A.A.* Monitoring potentsial'no opasnykh ob"ektov na osnove logikoveroyatnostnogo modelirovaniya (Monitoring of potentially dangerous objects based on logical and probabilistic modeling) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2009. – 152 s. (In Russian)]
 14. *Глушко В.С.* Интегрированная система мониторинга окружающей среды объектов нефтегазового комплекса для превентивного предотвращения пожара: дис. ... канд. техн. наук – М.: 2014. – 129 с. [*Glushko, V.S.* Integrirovannaya sistema monitoringa okruzhayushchei sredy ob"ektov neftegazovogo kompleksa dlya preventivnogo predotvrashcheniya pozhara (Integrated environmental monitoring system for oil and gas facilities for preventive fire prevention) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2014. – 129 s. (In Russian)]
 15. *Jiang, S., Zhu, S., Guo, X., Chen, C., Li, Z.* Safety Monitoring System of Steel Truss Structures in Fire // *Journal of Constructional Steel Research.* – 2020. – 172. – P. 1–11.
 16. *Li, Y., Yi, J., Zhu, X., Wang, Z., Xu, F.* Developing a Fire Monitoring and Control System Based on IoT // *2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering.* – 2016. – P. 174–178.
 17. *Распоряжение* Правительства РФ от 27.08.2005 N 1314-р. Об одобрении Концепции федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры Российской Федерации и опасных грузов. – Москва, 2005. [*Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 27.08.2005 N 1314-r.* Ob odobrenii Kontseptsii federal'noi sistemy monitoringa kriticheski vazhnykh ob"ektov i (ili) potentsial'no opasnykh ob"ektov infrastruktury Rossiiskoi Federatsii i opasnykh грузов (Order of the Government of the Russian Federation of August 27, 2005 N 1314-r. On approval of the Concept of the federal monitoring system for critical facilities and (or) potentially hazardous infrastructure facilities of the Russian Federation and dangerous goods). – Moscow, 2005. (In Russian)]
 18. *Рычихина Э.Н.* Мониторинг как общая функция управления. – У.: УГТУ, 2008. – 140 с. [*Rychikhina, E.N.* Monitoring kak obshchaya funktsiya upravleniya (Monitoring as a general management function) – Uhta: USTU, 2008. – 140 s. (In Russian)]
 19. *Израэль Ю.А.* Концепция мониторинга состояния биосферы // *Мониторинг состояния окружающей природной среды: сб. науч. тр.* – Л.: Наука, 1977. – 126 с. [*Izrael', Yu.A.* Kontseptsiya monitoringa sostoyaniya biosfery (Biosphere



- monitoring concept) // Monitoring of the state of the environment: collection of articles. – Leningrad: Science, 1977. – 126 s. (In Russian)]
20. *Герасимов И.П.* Структура научного исследования: философский анализ познавательной деятельности. – М.: Мысль, 1985. – 20 с. [*Gerasimov, I.P.* Struktura nauchnogo issledovaniya: filosofskii analiz poznavatel'noi deyatelnosti (Research structure: philosophical analysis of cognitive activity) – Moscow: Mysl', 1985. – 20 s. (In Russian)]
 21. *Новиков Д.А.* Методология управления. – М.: Либроком, 2011. – 128 с. [*Novikov, D.A.* Metodologiya upravleniya (Control methodology) – Moscow: Libracom, 2011. – 128 s. (In Russian)]
 22. *Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В.* Модели и механизмы управления безопасностью. – М.: Синтег, 2001. – 160 с. [*Burkov, V.N., Gracianskii, E.V., Dzubko, S.I., Shepkin, A.V.* Modeli i mekhanizmy upravleniya bezopasnost'yu (Security management models and mechanisms) – Moscow: Sinteg, 2001. – 160 s. (In Russian)]
 23. *Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М.* Целенаправленный выбор: модели, отношения, алгоритмы. – М.: ИПУ РАН, 1996. – 11 с. [*Anohin, A.M., Glotov, V.A., Pavelev, V.V., Cherkashin, A.M.* Tselenapravlennyi vybor: modeli, otnosheniya, algoritmy (Purposeful choice: models, relationships, algorithms) – Moscow: Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, 1996. – 11 s. (In Russian)]
 24. *Половинкина А.И.* Модели и механизмы оптимального управления пожарной безопасностью региона: дис. канд. техн. наук – М.: 2003. – 191 с. [*Polovinkina, A.I.* Modeli i mekhanizmy optimal'nogo upravleniya pozharnoi bezopasnost'yu regiona (Models and mechanisms of optimal management of fire safety in the region) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2003. – 191 s. (In Russian)]
 25. *Кузовлев А.В.* Модели и алгоритмы управления пожарной безопасностью на основе программ регионального развития: дисс. канд. техн. наук. – М. – 2014. – 174 с. [*Kuzovlev, A.V.* Modeli i algoritmy upravleniya pozharnoi bezopasnost'yu na osnove programm regional'nogo razvitiya (Fire safety management models and algorithms based on regional development programs) – Moscow: dissertation of the candidate of technical sciences, 2014. – 174 s. (In Russian)]
- Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.*
- Поступила в редакцию 19.07.2021,
после доработки 1.11.2021.
Принята к публикации 22.11.2021.*
- Шихалев Денис Владимирович** – канд. техн. наук, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва,
✉ evacsystem@gmail.com.

PROBLEMS OF MANAGING THE FIRE SAFETY SYSTEM OF A FACILITY. PART II: MONITORING METHODS

D.V. Shikhalev

The State Fire Academy, the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM), Moscow, Russia

✉ evacsystem@gmail.com

Abstract. This paper overviews fire safety monitoring methods for a facility and state assessment methods for socio-economic systems used in fire safety. As discovered, none of the existing fire safety monitoring systems has a decision support procedure for adjusting a parameter (or several parameters) deviating from a given range. The majority of fire safety monitoring systems only assess the state of fire protection systems and transmit information on their triggering to the operational services. Thus, fire safety monitoring is simplified to assessing the state of fire automation systems, which cannot objectively reflect the fire safety state of the facility. As established, the integrated rating procedure is a most developed tool for assessing the state of a complex socio-economic system. This procedure is widespread in the theory of active systems. Its application to fire safety assessment is described. The existing contradictions in the management of fire safety systems are revealed, and some ways to resolve them are presented.

Keywords: fire safety, management, assessment of the facility's state, fire safety system, monitoring.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫМ МОНОПОЛЬНЫМ РЫНКОМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ¹

В.А. Стенников, О.В. Хамисов, А.В. Пеньковский

Аннотация. Сформулирован один из возможных подходов по управлению централизованным теплоснабжением потребителей в условиях иерархической двухуровневой системы, в которой верхний уровень представлен регулирующим органом (региональная служба по тарифам), в обязанности которого входит регулирование тарифа на тепловую энергию для потребителей, а нижний – системой централизованного теплоснабжения, технологически и организационно объединяющей функции по производству и транспортировке тепловой энергии в рамках единой теплоснабжающей организации. Дано описание взаимодействия участников процесса теплоснабжения потребителей. Предложены критерии оптимизации верхнего и нижнего уровней. На основе моделей теории гидравлических цепей и двухуровневого программирования разработана иерархическая математическая модель системы централизованного теплоснабжения потребителей, функционирующая в условиях регулируемого монопольного рынка тепловой энергии. С помощью разработанного научно-методического обеспечения выполнены практические исследования реальной системы централизованного теплоснабжения г. Ангарска.

Ключевые слова: системы централизованного теплоснабжения, рынок тепловой энергии, математическое моделирование, иерархическая схема управления, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

На рынках тепловой энергии многих стран важная роль отводится централизованному теплоснабжению. В мире сейчас насчитывается около 80 тыс. систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) [1], из них 50 тыс. СЦТ находятся в России [2], 6 тыс. крупных СЦТ действуют в Европе [3], прочие 24 тыс. СЦТ расположены в Китае, США, Канаде, в странах бывшего СССР (Украина, Казахстан, Беларусь и др.).

Согласно данным компании Global Market Insights², объем мирового рынка централизованного теплоснабжения в 2019 г. составил более 150 млрд

долларов США, на нем было произведено около 3300 млн Гкал тепловой энергии, из них почти 1300 млн Гкал (или почти 40%) – в Российской Федерации.

В мировой практике для управления рынками централизованного теплоснабжения применяются две организационные модели: конкурентная модель и модель естественной монополии.

Наличие конкуренции на рынке централизованного теплоснабжения, как и в других сферах, играет весьма важную роль, так как это способствует росту эффективности производства тепловой энергии, улучшению ее качества и, как следствие, снижению ее цены, что может благоприятно отразиться на развитии отрасли. Технологическая основа конкурентной модели складывается из нескольких независимых источников тепла (ИТ), которые связаны с потребителями тепловыми сетями (ТС). При этом необходимо, чтобы ТС были организационно отделены от генерации тепла и объединены в единую теплосетевую компанию, относящуюся к самостоятельной сфере деятельности. Подобную организационную модель принято называть «Единый

¹ Исследования выполнены в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН в рамках проектов государственного задания № FWEU-2021-0002 (регистрационный номер АААА-А21-121012090012-1) и FWEU-2021-0006 (регистрационный номер АААА-А21-121012090034-3) фундаментальных исследований СО РАН.

² URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/district-heating-market> (дата обращения: 26.09.2021).



закупщик» [4, 5]. Конкурентная модель на рынке централизованного теплоснабжения успешно функционирует в некоторых европейских странах, таких как Германия [3], Финляндия [6], Швеция [7].

Для организации теплоснабжения потребителей наиболее часто применяется модель теплового рынка в виде естественной монополии, которой свойственно регулирование тарифа для потребителей. Подобная модель теплового рынка имеет место во многих странах Европейского союза, таких как Нидерланды [8], Польша [9], Литва [10], Латвия [11, 12], Норвегия [13], Эстония [14], а также в России, Китае и др. В каждой конкретной стране контроль над размером тарифов на тепловую энергию осуществляет, как правило, орган исполнительной власти в области государственного регулирования цен (тарифов) либо орган местного самоуправления в случае наделения его соответствующими полномочиями (табл. 1).

Организационная модель управления теплоснабжением потребителей в форме естественной монополии с регулированием тарифа для потребителей может быть представлена в виде иерархической вертикально интегрированной системы, состоящей из двух уровней рис. 1.

Верхний уровень здесь представлен регулятором, в обязанности которого входит регулирование тарифа на тепловую энергию для потребителей, а нижний – СЦТ, в которой технологически и организационно объединены производство и транспор-

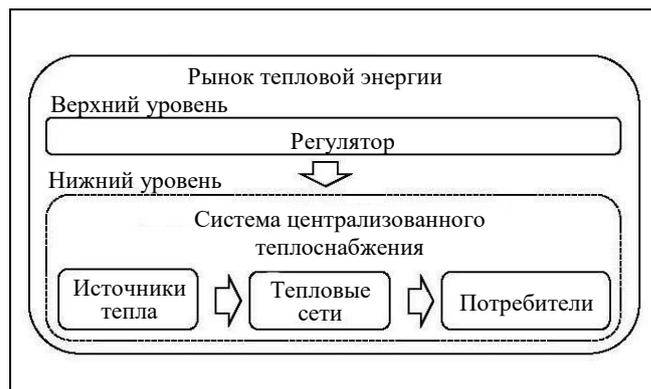


Рис. 1. Двухуровневая модель управления теплоснабжением потребителей

тировка тепловой энергии (ТЭ) в рамках единой теплоснабжающей организации (ЕТО). Основная идея двухуровневого построения схемы управления монопольным рынком централизованного теплоснабжения заключается в выделении подсистем, соответствующих конкретным субъектам рынка, для их дальнейшего моделирования с учетом реализации поставленных целевых установок.

Участники рынка теплоснабжения взаимодействуют друг с другом следующим образом. На основе прогнозных значений величины спроса на ТЭ со стороны потребителей ЕТО производит ТЭ и реализует ее потребителям исходя из того, что ИТ в совокупности производили бы такой суммарный объем ТЭ, который покрывал бы заданный

Таблица 1

Органы, осуществляющие регулирование тарифов на тепловую энергию в различных странах мира

Страна	Нидерланды	Польша	Литва	Латвия
Регулирующий орган	Управление по защите потребителей и рынков (Authority for Consumer and Market ³)	Управление по вопросам энергетического регулирования (Energy Regulatory Office ⁴)	Национальная комиссия по энергетическому контролю и ценам (National Control Commission for Prices and Energy ⁵)	Комиссия по коммунальным предприятиям, (Sabiedrisko pakalpojumu regulēšanas Komisijas ⁶)
Страна	Норвегия	Эстония	Россия	Китай
Регулирующий орган	Норвежское управление водных ресурсов и энергетики (Norwegian Water Resources and Energy Directorate ⁷)	Управление по вопросам конкуренции Эстонии (Republic of Estonian Competition Authority ⁸)	Федеральная антимонопольная служба, органы местного самоуправления ⁹	Муниципальные органы власти [15]

³ URL: <https://www.acm.nl/en/about-acm/our-organization/the-netherlands-authority-for-consumers-and-markets> (дата обращения: 01.10.2021).

⁴ URL: <http://www.ure.gov.pl/en/about-us/presidents-duties/22,Presidents-duties.html> (дата обращения: 01.10.2021).

⁵ URL: <http://www.regula.lt/en/Pages/default.aspx> (дата обращения: 01.10.2021).

⁶ URL: <https://www.sprk.gov.lv/content/siltumenerģija> (дата обращения: 01.10.2021).

⁷ URL: <https://www.nve.no/energy-market-and-regulation/?ref=mainmenu> (дата обращения: 01.10.2021).

⁸ URL: <https://www.riigiteataja.ee/en/eli/ee/Riigikogu/act/520062017016/consolide> (дата обращения: 01.10.2021)

⁹ Федеральный закон «О теплоснабжении» от 27.07.2010 № 190-ФЗ.

спрос со стороны потребителей, обеспечивая при этом получение ими максимальной прибыли, с учетом имеющихся возможностей по мощностям ИТ и физико-технических ограничений ТС. В свою очередь, регулятор, защищая права потребителей, устанавливает такой уровень тарифа на ТЭ, который, с одной стороны, стимулировал бы ИТ удовлетворить заданный спрос со стороны потребителей, а с другой стороны, позволил бы им получить максимальную прибыль от продажи ТС при соблюдении оптимальных режимов в ТС.

Математическое описание такой системы осуществляется с помощью двухуровневого моделирования [16]. Переход к одноуровневой задаче оптимизации осуществляется путем замены задачи выпуклой оптимизации второго (нижнего) уровня условиями оптимальности первого порядка. Отметим, что данные исследования являются развитием существующих подходов и методов и опираются в большей мере на работу [17], из которой приняты основные положения при математическом моделировании объектов теплоснабжающей системы, включая источники тепловой энергии, тепловые сети и потребителей. Необходимо уточнить, что исследуемая постановка принципиально отличается от модели, описанной в статье [17], где рассматривается равноправное взаимодействие участников теплоснабжения, в то время как предлагаемая далее модель является иерархической и, следовательно, обладает совершенно иными математическими свойствами.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО РЫНКА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

1.1. Моделирование систем централизованного теплоснабжения

Топология СЦТ описывается матрицей инцидентности A , в которой число строк совпадает с числом узлов ($i = 1, \dots, m$), а число столбцов с числом ветвей ($j = 1, \dots, n$). Элементы a_{ji} матрицы A определяются так:

$$a_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{если дуга } i \text{ не имеет связи с узлом } j, \\ 1, & \text{если поток на дуге } i \text{ исходит из узла } j, \\ -1, & \text{если поток на дуге } i \text{ входит в узел } j, \end{cases}$$

$$i \in I, j \in J,$$

где I – множество участков тепловой сети; J – множество узлов тепловой сети.

Моделирование СЦТ осуществляется на временном интервале, который определяется началь-

ным моментом времени $\tau_0 = 1$ (соответствующим суммарной расчетной тепловой нагрузке) и конечным (расчетным) моментом времени τ_{fin} (например, календарным числом часов в году – 8760). Множество $T = \{1, 2, \dots, \tau_{fin}\}$ есть множество всех временных интервалов.

1.2. Моделирование источников тепловой энергии

Моделирование поведения ИТ в условиях рынка осуществляется с учетом того, что в каждый момент времени $\tau \in T$ они в совокупности производят такой объем тепловой энергии, который бы, с одной стороны, покрывал заданный спрос со стороны потребителей, а с другой стороны, позволял бы ИТ максимизировать свою прибыль с учетом затрат на производство тепла и имеющихся ограничений на производительность.

Каждому источнику тепла сопоставим переменную $Q_{\tau j}^G$ – объем тепла, производимого в момент времени $\tau \in T$ источником $j \in J_G$, где J_G – множество источников тепловой энергии. Обозначим через $w_{\tau j}^{HE}$ цену за единицу тепловой энергии, получаемую генератором $j \in J_G$ в момент времени τ , а через $w_j^P = \gamma_j / \bar{Q}_j^G$ – фиксированную плату (ставку) за единицу установленной мощности, где γ_j – условно-постоянные затраты источника тепла j , \bar{Q}_j^G – установленная (максимальная) мощность источника тепла j . Тогда прибыль j -го источника от произведенного им тепла в момент времени τ с учетом его ограничений по производительности тепловой энергии определяется, аналогично работе [17], исходя из решения следующей задачи оптимизации, дополнительно учитывающей выручку за предоставленную тепловую мощность:

$$F_{\tau j}^G(Q_{\tau j}^G) = w_j^P \bar{Q}_j^G + w_{\tau j}^{HE} Q_{\tau j}^G - Z_{\tau j}^G(Q_{\tau j}^G) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\underline{Q}_j^G \leq Q_{\tau j}^G \leq \bar{Q}_j^G, \quad (2)$$

где \underline{Q}_j^G – минимально допустимая используемая мощность источника тепла; $Z_{\tau j}^G(Q_{\tau j}^G)$ – затраты j -го источника на производство тепловой энергии в объеме $Q_{\tau j}^G$, которые представляются в виде полинома второй степени [17].

Цену $w_{\tau j}^{HE}$ в задаче (1), (2) будем рассматривать как внешний параметр. Цена w_j^P – заданная константа. Функция прибыли $F_{\tau j}^G(Q_{\tau j}^G)$ – сильно вогнутая функция, следовательно, задача (1), (2) имеет единственное решение $Q_{\tau j}^{G,*}(w_{\tau j}^{HE})$:



$$Q_{vj}^{G,*}(w_{vj}^{HE}) = \begin{cases} \underline{Q}_j^G, & w_{vj}^{HE} < \underline{w}_{vj}^{HE}, \\ \frac{w_{vj}^{HE} - \beta_j}{2\alpha_j}, & \underline{w}_{vj}^{HE} \leq w_{vj}^{HE} \leq \overline{w}_{vj}^{HE}, \\ \overline{Q}_j^G, & w_{vj}^{HE} > \overline{w}_{vj}^{HE}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\underline{w}_{vj}^{HE} = 2\alpha_j \underline{Q}_j^G + \beta_j$, $\overline{w}_{vj}^{HE} = 2\alpha_j \overline{Q}_j^G + \beta_j$ – цены на тепловую энергию источника j , соответствующие минимальной и установленной (максимальной) мощностям; α_j, β_j – коэффициенты аппроксимации в функции затрат ИТ $Z_{vj}^G(Q_{vj}^G)$ [17].

1.3. Моделирование потребителей тепловой энергии

Множество потребителей тепловой энергии J_D укрупненно можно представить как объединение трех подмножеств $J_D = J_{DH} \cup J_{DIG} \cup J_{DIN}$, где J_{DH} – потребители жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ); J_{DIG} – промышленные потребители, присоединенные к тепловым сетям, не являющимся узлами – источниками (коллекторами) тепла; J_{DIN} – промышленные потребители, расположенные на коллекторах источников тепла. Нетрудно видеть, что введенное множество обладает свойством

$$J_{DIN} \subset J_G, J_G \cap J_{DIG} = \emptyset, J_{DIN} \cap J_{DIG} = \emptyset. \quad (4)$$

Пусть Q_{vj}^D – суммарный спрос потребителей в узле $j \in J_D$ в момент времени $\tau \in T$. Для краткости изложения спрос потребителей ЖКХ на тепловую энергию $Q_{vj}^D, j \in J_{DH}$, где J_{DH} – множество потребителей ЖКХ, будем обозначать как Q_{vj}^{DH} , спрос потребителей промышленного сектора, присоединенных к тепловым сетям $Q_{vj}^D, j \in J_{DIG}$, – через Q_{vj}^{DIG} ; спрос потребителей промышленного сектора, расположенных на коллекторах источников $Q_{vj}^D, j \in J_{DIN}$, – через Q_{vj}^{DIN} . Тогда с учетом выражения (4),

$$Q_{vj}^D = \begin{cases} Q_{vj}^{DH} + Q_{vj}^{DIG}, & j \in J_{DH} \cap J_{DIG}, \\ Q_{vj}^{DH} + Q_{vj}^{DIN}, & j \in J_{DH} \cap J_{DIN}, \\ Q_{vj}^{DH}, & j \in J_{DH} \setminus (J_{DIG} \cap J_{DIN}), \\ Q_{vj}^{DIG}, & j \in J_{DIG} \setminus J_{DH}, \\ Q_{vj}^{DIN}, & j \in J_{DIN} \setminus J_{DH}. \end{cases}$$

Суммарный спрос на тепловую энергию со стороны потребителей ЖКХ Q_{vj}^{DH} в каждый момент времени τ складывается из спроса на тепловую энергию для нужд отопления Q_{vj}^{DHH} (эта величина изменяется в течение отопительного периода в зависимости от температуры наружного воздуха) и горячего водоснабжения Q_{vj}^{DHW} (не изменяется в течение года):

$$Q_{vj}^{DH} = Q_{vj}^{DHH} + Q_{vj}^{DHW}, \quad j \in J_{DH}.$$

Определение спроса на тепловую энергию для нужд отопления со стороны потребителей ЖКХ осуществляется с помощью уравнения Россандера [17].

Развитие рыночных принципов функционирования энергетической отрасли в России, в частности, в системах централизованного теплоснабжения, привело к появлению новой переменной, которой является стоимость (цена) тепловой энергии. С точки зрения экономической теории потребность в каком-либо товаре характеризуется кривой спроса, показывающей зависимость спроса от цены.

Для большинства рынков централизованного теплоснабжения характерен неэластичный спрос. Это объясняется тем, что в течение отопительного сезона спрос на рынках тепла представляет собой фиксированную величину и поэтому жестко привязан к конкретной системе. При этом цены на тепловую энергию не корректируются в режиме реального времени в зависимости от загрузки ИТ, а рассчитываются и утверждаются на среднесрочную или долгосрочную перспективу. Вместе с тем, в теплоснабжении уже сформировался рынок современного и эффективного оборудования малой и средней мощности (как правило, это котельные). С его расширением нередко становится экономически целесообразным сооружение собственных ИТ (как правило, на площадках промышленных объектов или индивидуальные ИТ в частной жилой застройке) небольшой мощности с приемлемыми единовременными затратами и минимальными сроками окупаемости. В результате этого спрос на тепловую энергию может приобретать эластичный характер.

Моделирование поведения потребителей промышленного сектора осуществляется на основе обратной функции спроса, построение которой, как правило, осуществляется по результатам реальных расчетов для отдельно рассматриваемых промышленных потребителей путем аппроксимации ретроспективных данных, при этом учитываются прогнозные оценки объемов потребления тепловой энергии и цены на нее. Так, для промышленных потребителей, присоединенных к тепловым сетям, обратная функция спроса $w_{vj}^{DIG} = \Phi^{-1}(Q_{vj}^{DIG})$, где w_{vj}^{DIG} – покупная цена, которую потребитель готов заплатить за тепло, полученное в объеме Q_{vj}^{DIG} , руб./Гкал, имеет линейный вид [17].

Аналогично, для промышленных потребителей, расположенных на коллекторах источника тепла, обратная функция спроса примет вид

$$w_{ij}^{DIN} = \xi_j^{DIN} - \vartheta_j^{DIN} Q_{ij}^{DIN}, \quad j \in J_{DIN},$$

где ξ_j^{DIN} , ϑ_j^{DIN} – постоянные, полученные в процессе аппроксимации фактических значений объема покупки тепловой энергии промышленным предприятием $j \in J_{DIN}$ в зависимости от ее цены; w_{ij}^{DIN} – покупная цена, которая определяется только стоимостью производства тепловой энергии, руб./Гкал; Q_{ij}^{DIN} – объем тепловой энергии, приобретаемой промышленным предприятием $j \in J_{DIN}$, расположенным на коллекторах источника тепловой энергии, Гкал/ч.

Колебания спроса на тепло в зависимости от времени суток и от погодных условий относятся к основной проблеме рынка теплоэнергии. Поэтому предлагается исследовать взаимодействие производителей и потребителей в течение каждого часа из заданного временного периода. Такой дискретный подход к моделированию является практически значимым, поскольку позволяет учитывать как суточные, так и сезонные факторы спроса на тепловую энергию, которые могут существенным образом повлиять на решение задачи по определению объемов спроса и производства тепловой энергии для каждого ИТ, а значит, и на размер получаемой ими прибыли.

1.4. Моделирование тепловых сетей

Математическая модель, описывающая тепловые сети с организацией ЕТО, в отличие от модели конкурентного рынка тепловой энергии (экстремальная постановка) [17], представляет собой систему линейных и нелинейных уравнений, а именно, к материальному балансу (первый закон Кирхгофа), который выступает в качестве ограничений в задаче оптимизации затрат в тепловые сети [17], добавляются уравнения, отражающие второй закон Кирхгофа (5) и замыкающие соотношения (6):

$$y_\tau - A^T p_\tau = 0, \quad (5)$$

$$y_{ti} - s_i x_{ti} |x_{ti}| = -H_{ti}, \quad i \in I, \quad (6)$$

где $y_\tau = (y_{\tau 1}, \dots, y_{\tau n})^T$, y_{ti} – перепад давления на i -м участке тепловой сети в момент времени τ , м вод. ст.; A^T – транспонированная матрица инцидентности; $p_\tau = (p_{\tau 1}, \dots, p_{\tau m})^T$, p_{ij} – давление в j -м узле в момент времени τ , м вод. ст.; s_i – коэффициент гидравлического сопротивления ветвей i -го участка тепловой сети ($\text{м}^2/\text{Т}^2$); $x_\tau = (x_{\tau 1}, \dots, x_{\tau n})^T$, x_{ti} – расход теплоносителя на i -м участке тепловой сети в момент времени τ , т/ч; H_{ti} – действующий напор

на i -м участке тепловой сети в момент времени τ , м вод. ст.

Переменные в системе уравнений, определяющие оптимальное потокораспределение в тепловой сети, представлены векторами x_τ , y_τ и p_τ . Если в каждый момент времени $\tau \in T$ соблюдается материальный баланс

$$\sum_{j \in J_G} Q_{ij}^G = \sum_{j \in J_{DH}} Q_{ij}^{DH} + \sum_{j \in J_{DIG}} Q_{ij}^{DIG} + \sum_{j \in J_{DIN}} Q_{ij}^{DIN},$$

то данная система имеет решение $(x_\tau^*, y_\tau^*, p_\tau^*)$ [18]. Это решение будет всегда единственным по переменным (x_τ^*, y_τ^*) и не единственным по переменным p_τ^* . Для того чтобы добиться единственности по p_τ , достаточно зафиксировать давление в одном узле [18]. Методология поиска оптимального потокораспределения в ТС в виде решения системы линейных и нелинейных уравнений хорошо отработана [18], ее применение не представляет большого труда.

Решение задачи нахождения оптимального потокораспределения в ТС в условиях рынка усложняется по сравнению с решением традиционной задачи их технико-экономического расчета, так как в балансовом соотношении известны только фиксированные нагрузки потребителей ЖКХ Q_{ij}^{DH} . Объемы производства источниками тепла Q_{ij}^G и нагрузки промышленных потребителей Q_{ij}^{DIG} и Q_{ij}^{DIN} неизвестны, следовательно, задача поиска оптимального потокораспределения в ТС становится недоопределенной.

Предположим, что набор цен производства тепловой энергии источниками $w_\tau^{HE} = \{w_{ij}^{HE}: j \in J_G\}$ задан. Тогда по формуле (3) находятся значения объема генерации для каждого источника

$$Q_{ij}^G = Q_{ij}^{G,*}(w_{ij}^{HE}), \quad j \in J_G,$$

и суммарное предложение теплоэнергии $\sum_{j \in J_G} Q_{ij}^G = \sum_{j \in J_G} Q_{ij}^{G,*}(w_{ij}^{HE})$. После этого можно определить объем тепла $Q_\tau^{TSI}(w_\tau^{HE})$, предложенного промышленному сектору:

$$Q_\tau^{TSI}(w_\tau^{HE}) = \sum_{j \in J_G} Q_{ij}^{G,*}(w_{ij}^{HE}) - \sum_{j \in J_{DH}} Q_{ij}^{DH}. \quad (7)$$

Остается выяснить, как суммарное предложение $Q_\tau^{TSI}(w_\tau^{HE})$ распределится между конкретными потребителями тепла промышленного сектора, т. е. определить узловы величины Q_{ij}^{DIN} и Q_{ij}^{DIG} , которые должны удовлетворять равенству

$$\sum_{j \in J_{DIG}} Q_{ij}^{DIG} + \sum_{j \in J_{DIN}} Q_{ij}^{DIN} = Q_\tau^{TSI}(w_\tau^{HE}).$$

Для нахождения этих узловых величин применяется подход, основанный на построении избыточных проектных схем теплоснабжающих систем [18]. Избыточная схема формируется на базе исходной расчетной схемы теплоснабжающей систе-



мы путем введения фиктивного узла с номером $m + 1$ и фиктивных дуг, выходящих из узлов $j \in J_{DIN} \cap J_{DIG}$, в которых находятся промышленные потребители, и входящих в фиктивный узел $m + 1$. Фиктивным дугам присваиваются номера от $n + 1$ до $n + r$, где r – количество промышленных потребителей (количество элементов множества $J_{DIN} \cup J_{DIG}$). В фиктивном узле задается суммарный спрос промышленных потребителей, равный $Q_{\tau}^{TSI}(w_{\tau}^{HE})$ из формулы (7), а сам спрос промышленных потребителей в узлах $j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$ полагается равным нулю. Поток тепла из каждого узла $j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$ в узел $m + 1$ обозначается через $x_{\tau\eta(j)}$, где $\eta(j) \in \{n + 1, \dots, n + r\}$ – номер фиктивной дуги, исходящей из узла j . Сопротивления и напоры фиктивных дуг также полагаются равными нулю т. е. $s_{\eta(j)} = 0, H_{\tau\eta(j)} = 0, j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$. Тогда в силу замыкающих соотношений вида (6) перепады давления также будут равны нулю: $y_{\tau\eta(j)} = 0, j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$. Далее из формулы (5) получаем $(A)_{\tau\eta(j)}^T p_{\tau} = 0$, где $(A)_{\tau\eta(j)}^T$ – $\eta(j)$ -я строка транспонированной матрицы инцидентности. Равенства $(A)_{\tau\eta(j)}^T p_{\tau} = 0, j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$, эквивалентны равенствам $p_{\tau} = p_{\tau(m+1)}, j \in J_{DIN} \cup J_{DIG}$, т. е. давление в узлах промышленного сектора равно давлению в фиктивном узле. Как упоминалось выше, для достижения единственности решения по p_{τ} достаточно зафиксировать давление в одном из узлов СЦТ, поэтому, не уменьшая общности, традиционно [18] будем считать, что $p_{\tau(m+1)} = 0$. Вследствие этого, аналоги уравнений (5), (6), соответствующие фиктивным ветвям, отсутствуют. Итоговая система уравнений избыточной схемы с учетом балансовых (материальных) соотношений в узлах (первый закон Кирхгофа, см. формулы (8)–(16)) примет вид

$$A_j x_{\tau} + x_{\tau\eta(j)} = Q_{\tau j}^{G,*}(w_{\tau j}^{HE}) - Q_{\tau j}^{DH}, j \in J_{DH} \cap J_{DIN}, \quad (8)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{\tau j}^{G,*}(w_{\tau j}^{HE}) - Q_{\tau j}^{DH}, j \in J_G \cap J_{DH} \setminus J_{DIN}, \quad (9)$$

$$A_j x_{\tau} + x_{\tau\eta(j)} = Q_{\tau j}^{G,*}(w_{\tau j}^{HE}), j \in J_{DIN} \setminus J_{DH}, \quad (10)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{\tau j}^{G,*}(w_{\tau j}^{HE}), j \in J_G \setminus J_{DH} \cup J_{DIN}, \quad (11)$$

$$A_j x_{\tau} = -Q_{\tau j}^{DH}, j \in J_{DH} \setminus (J_G \cup J_{DIG}), \quad (12)$$

$$A_j x_{\tau} + x_{\tau\eta(j)} = 0, j \in J_{DIG} \setminus J_{DH}, \quad (13)$$

$$A_j x_{\tau} + x_{\tau\eta(j)} = -Q_{\tau j}^{DH}, j \in J_{DH} \setminus J_{DIG}, \quad (14)$$

$$A_j x_{\tau} = 0, j \in J_0, \quad (15)$$

$$-\sum_{j \in J_{DIN} \cup J_{DH}} x_{\tau\eta(j)} = -Q_{\tau}^{TSI}(w_{\tau}^{HE}), \quad (16)$$

$$y_{\tau} - A^T p_{\tau} = 0, \quad (17)$$

$$y_{\tau i} - s_i x_{\tau i} |x_{\tau i}| = -H_{\tau i}, i \in I. \quad (18)$$

Уравнение (16) соответствует введенному фиктивному узлу. В силу балансового соотношения (7) данная система всегда имеет решение $(x_{\tau}^*(w_{\tau}^{HE}), y_{\tau}^*(w_{\tau}^{HE}), p_{\tau}^*(w_{\tau}^{HE}))$. Объем потребления тепла промышленными потребителями будет определяться равенствами

$$\begin{aligned} Q_{\tau j}^{DIG}(w_{\tau j}^{HE}) &= x_{\tau\eta(j)}^*(w_{\tau}^{HE}), j \in J_{DIG}, \\ Q_{\tau j}^{DIN}(w_{\tau j}^{HE}) &= x_{\tau\eta(j)}^*(w_{\tau}^{HE}), j \in J_{DIN}. \end{aligned} \quad (19)$$

Применение метода избыточных проектных схем проиллюстрируем на примере теплоснабжающей системы, изображенной на рис. 2, а. Здесь и на рис. 2, б цифрами обозначены номера узлов, цифрами в кружках – номера ветвей; Q_1^G, Q_5^G – нагрузки источников тепла; Q_1^{DIN} – нагрузка потребителя, расположенного на коллекторе источника тепла; Q_3^{DIG} – нагрузка промышленного потребителя, присоединенного к тепловым сетям; Q_2^{DH}, Q_4^{DH} – нагрузки потребителей ЖКХ; Q_6^{TSI} – суммарная нагрузка промышленных потребителей. Рассматриваемая теплоснабжающая система (см. рис. 2, а) состоит из $m = 5$ узлов, $n = 8$ ветвей, $J = \{1, 2, 3, 4, 5\}, I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$. Соответствие между ветвями и узлами представлено в табл. 2.

Матрица инцидентности для схемы, изображенной на рис. 2, а, имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Узлы – источники тепла представлены множеством $J_G = \{1, 5\}$; узлы – потребители ЖКХ – множеством $J_{DH} = \{2, 4\}$; узлы, в которых есть промышленные потребители, но нет источников тепла – множеством $J_{DIG} = \{3\}$; узлы, в которых есть источники тепла и промышленные потребители – множеством $J_{DIN} = \{1\}$, простые узлы разветвления представлены пустым множеством $J_0 = \emptyset$. С учетом изложенного, уравнения первого закона Кирхгофа для приведенной на рис. 2, а схемы теплоснабжения будут иметь вид

$$\begin{aligned} x_{\tau 1} + x_{\tau 2} + x_{\tau 3} &= Q_{\tau 1}^G - Q_{\tau 1}^{DIN}, \\ -x_{\tau 1} + x_{\tau 4} - x_{\tau 6} &= -Q_{\tau 2}^{DH}, \\ -x_{\tau 2} - x_{\tau 4} - x_{\tau 5} - x_{\tau 7} &= -Q_{\tau 3}^{DIG}, \\ -x_{\tau 3} + x_{\tau 5} - x_{\tau 8} &= -Q_{\tau 4}^{DH}, \\ x_{\tau 6} + x_{\tau 7} + x_{\tau 8} &= Q_{\tau 5}^G. \end{aligned}$$

Пусть объемы производства тепла источниками $Q_{\tau 1}^G, Q_{\tau 5}^G$ и спрос в узлах с потребителями ЖКХ $Q_{\tau 2}^{DH}, Q_{\tau 4}^{DH}$ известны, тогда суммарный спрос со стороны промышленных потребителей определится следующим образом:

$$Q_{\tau}^{TSI} = Q_{\tau 1}^{DIN} + Q_{\tau 3}^{DIG} = Q_{\tau 1}^G + Q_{\tau 5}^G - Q_{\tau 2}^{DH} - Q_{\tau 4}^{DH}.$$

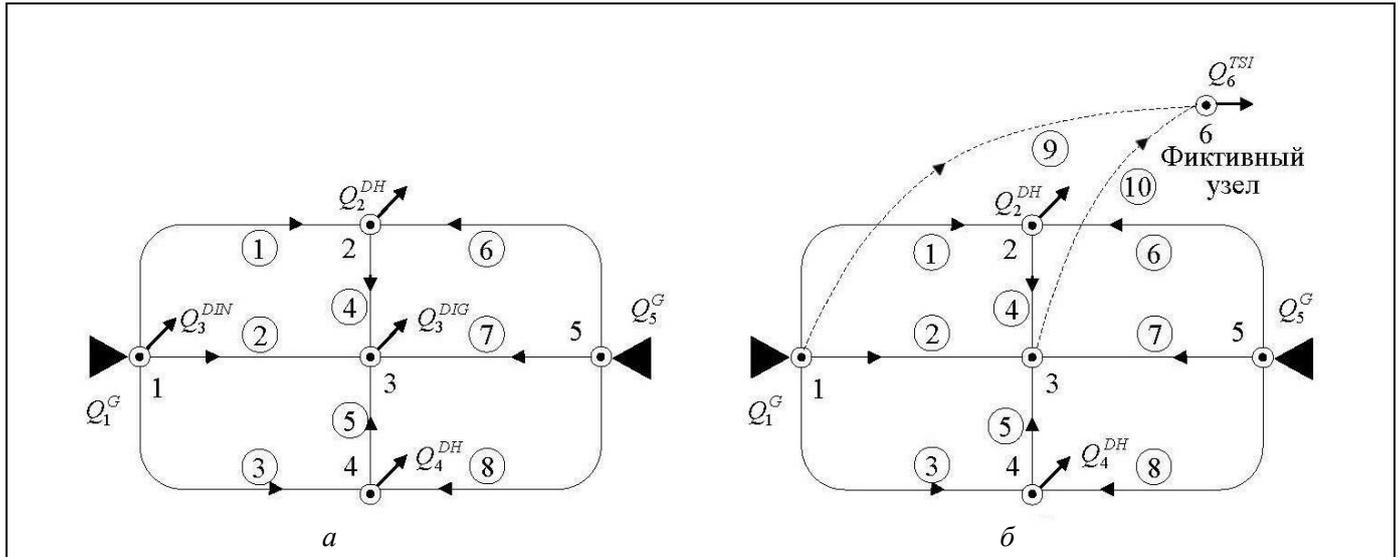


Рис. 2. Схема теплоснабжения: а – расчетная, б – избыточная

Таблица 2

Соответствие между ветвями и узлами

	Ветвь 1	Ветвь 2	Ветвь 3	Ветвь 4	Ветвь 5	Ветвь 6	Ветвь 7	Ветвь 8
Начальный узел	1	1	1	2	4	5	5	5
Конечный узел	2	3	4	3	3	2	3	4

Будем полагать, что $Q_{\tau}^{TSI} > 0$, иначе ситуация тривиальная. Схема на рис. 2, а представлена двумя промышленными потребителями $J_{DIN} \cup J_{DIG} = \{1, 3\}$, $r = 2$. Введем фиктивный узел под номером 6, фиктивную ветвь под номером 9, соединяющую узлы 1 и 6, и фиктивную ветвь под номером 10, соединяющую узлы 3 и 6, при этом $\eta(1) = 9$ и $\eta(3) = 10$ (рис. 2, б). В этом случае система уравнений, отражающая первый закон Кирхгофа для избыточной схемы, запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{\tau 1} + x_{\tau 2} + x_{\tau 3} + x_{\tau 9} &= Q_{\tau 1}^G, \\ -x_{\tau 1} + x_{\tau 4} - x_{\tau 6} &= -Q_{\tau 2}^{DH}, \\ -x_{\tau 2} - x_{\tau 4} - x_{\tau 5} - x_{\tau 7} + x_{\tau 10} &= 0, \\ -x_{\tau 3} + x_{\tau 5} - x_{\tau 8} &= -Q_{\tau 4}^{DH}, \\ x_{\tau 6} + x_{\tau 7} + x_{\tau 8} &= Q_{\tau 5}^G, \\ -x_{\tau 9} - x_{\tau 10} &= -Q_{\tau 6}^{TSI}. \end{aligned}$$

Вектор перетоков $x_{\tau}^*(w_{ij}^{HE})$, полученный в ходе решения системы уравнений поиска оптимального потокораспределения в ТС, соответствует минимальным затратам на транспортировку тепла по сети [18]. Тогда объем тепла, доставляемый промышленным потребителям в соответствии с выражением (7), определяется исходя из минимизации сетевых затрат на основе оптимального потокораспределения в ТС, согласно изложенному в работе [18]. За полученный объем тепла участники про-

мышленного сектора готовы платить по ценам, определяемым в соответствии с обратными функциями спроса $w_{ij}^{DIN} = \Phi^{-1}(Q_{ij}^{DIN})$, $w_{ij}^{DIG} = \Phi^{-1}(Q_{ij}^{DIG})$.

После расчета установившегося потокораспределения определяются сетевые затраты согласно формуле, приведенной в работе [17].

1.5. Модель управления теплоснабжением потребителей

При формировании математической модели управления теплоснабжением потребителей на регулируемом монопольном рынке централизованного теплоснабжения необходимо сформулировать постановку самой задачи, которая заключается в следующем. Требуется найти такое состояние регулируемого монопольного рынка централизованного теплоснабжения, при котором ИТ в совокупности производили бы такой суммарный объем ТЭ, который покрывал бы заданный спрос со стороны потребителей исходя из условия получения ими максимальной прибыли, а также с учетом имеющихся возможностей по мощностям ИТ и физико-технических ограничений ТС. При этом цена на ТЭ для промышленных потребителей определяется исходя из заданных для них обратных функций спроса, а регулятор устанавливает справедливый тариф на тепловую энергию для потребителей ЖКХ.



Для моделирования поведения регулятора необходимо формализовать его критерий цели. Будем считать, что регулятор, отстаивая интересы потребителей ЖКХ, стремится определить минимальный для них тариф на тепловую энергию w_τ^{DH} . Запишем экономический баланс СЦТ:

$$\sum_{j \in J_G} \left(w_{ij}^{HE} Q_{ij}^G + w_j^P \bar{Q}_j \right) + Z_\tau^{NET} (x_\tau) = w_\tau^{DH} \sum_{j \in J_{DH}} Q_{ij}^{DH} + \sum_{j \in J_{DIG}} w_{ij}^{DIG} Q_{ij}^{DIG} + \sum_{j \in J_{DIN}} w_{ij}^{DIN} Q_{ij}^{DIN}, \quad (20)$$

где $Z_\tau^{NET} (x_\tau)$ – затраты ТС, руб., которые рассчитываются по формуле, приведенной в работе [17].

Определим суммарный спрос из баланса (20). Выразим цену на ТЭ потребителей ЖКХ как аффинную функцию остальных переменных:

$$w_\tau^{DH} = f_\tau \left(w_\tau^{HE}, Q_\tau^G, Z_\tau^{NET}, w_\tau^{DIG}, Q_\tau^{DIG}, w_\tau^{DIN}, Q_\tau^{DIN} \right) = \frac{1}{\sum_{j \in J_{DH}} Q_{ij}^{DH}} \left[\sum_{j \in J_G} \left(w_{ij}^{HE} Q_{ij}^G + w_j^P \bar{Q}_j \right) + Z_\tau^{NET} (x_\tau) - \sum_{j \in J_{DIG}} w_{ij}^{DIG} Q_{ij}^{DIG} - \sum_{j \in J_{DIN}} w_{ij}^{DIN} Q_{ij}^{DIN} \right]. \quad (21)$$

Источники тепловой энергии, тепловая сеть и промышленные потребители функционируют исходя из своих интересов и напрямую не подчиняются регулятору. Как было описано ранее, ИТ максимизируют свою прибыль, тепловая сеть оптимизирует свои издержки на транспортировку тепловой энергии (путем решения задачи оптимального потокораспределения в ТС) от источников к потребителям, поведение промышленных потребителей формируется обратными функциями спроса. При этом определяющим в поведении источников, тепловых сетей, а также промышленных потребителей является вектор цен w_τ^{DH} . Следовательно, варьируя вектор цен w_τ^{HE} , регулятор может минимизировать тариф w_τ^{DH} в формуле (21), учитывая интересы источников, тепловых сетей и промышленных потребителей.

В соответствии с изложенным, приходим к следующей, двухуровневой модели. Регулятор представляет верхний уровень и в каждый момент времени $\tau \in T$ решает задачу оптимизации

$$w_\tau^{DH} = f_\tau \left(w_\tau^{HE}, Q_\tau^G, Z_\tau^{NET}, w_\tau^{DIG}, Q_\tau^{DIG}, w_\tau^{DIN}, Q_\tau^{DIN} \right) \rightarrow \min, \quad (22)$$

$$\underline{w}_\tau^{HE} \leq w_\tau^{HE} \leq \bar{w}_\tau^{HE}, \quad j \in J_G. \quad (23)$$

Вектор цен w_τ^{HE} регулятор передает на нижний уровень, состоящий из источников тепла, тепловых сетей и потребителей. Источники тепловой энер-

гии $j \in J_G$ решают задачи максимизации собственной прибыли (1), (2) и производят тепловую энергию в объеме $Q_{ij}^G = Q_{ij}^{G*} (w_{ij}^{HE})$ в соответствии с формулой (3). Спрос на тепловую энергию со стороны ЖКХ является постоянным, не зависящим от w_τ^{HE} . Зная величину предложения тепловой энергии со стороны источников и спрос со стороны ЖКХ, тепловая сеть, используя избыточную схему, решает задачу оптимального потокораспределения, определяя сетевые затраты и объемы тепловой энергии

$$Q_\tau^{DIG} = Q_{ij}^{DIG} (w_{ij}^{HE}), \quad Q_\tau^{DIN} = Q_{ij}^{DIN} (w_{ij}^{HE}),$$

поставляемые промышленным потребителям (19). Зная эти значения объемов, промышленные потребители назначают соответствующие цены согласно их функциям обратного спроса. После этого становятся известными все аргументы функции регулятора f в формуле (22), и он может определить полученный тариф на тепловую энергию для потребителей ЖКХ, соответствующий вектору w_τ^{HE} . Детальная схема взаимодействия между верхним и нижним уровнем системы представлена на рис. 3.

Опишем алгоритм $FV(w_\tau^{HE})$ вычисления значений целевой функции верхнего уровня.

Входная информация – вектор цен w_τ^{HE} .

Выходная информация – значение функции $FV(w_\tau^{HE})$.

Шаг FV.1. Вычислить объем $Q_{ij}^G = Q_{ij}^{G*} (w_{ij}^{HE})$, $j \in J_G$, используя формулу (3).

Шаг FV.2. Вычислить объем $Q_\tau^{TSI} (w_{ij}^{HE,k})$ по формуле (7).

Шаг FV.3. Определить перетоки $x_\tau^k = x_\tau^* (w_\tau^{HE,k})$, $\tilde{x}_\tau^k = \tilde{x}_\tau^* (w_\tau^{HE,k})$, решив систему уравнений (8)–(18).

Шаг FV.4. Вычислить сетевые затраты Z_τ^{NET} согласно изложенному в работе [17].

Шаг FV.5. Определить объемы тепловой энергии Q_τ^{DIG} и Q_τ^{DIN} по формулам (19).

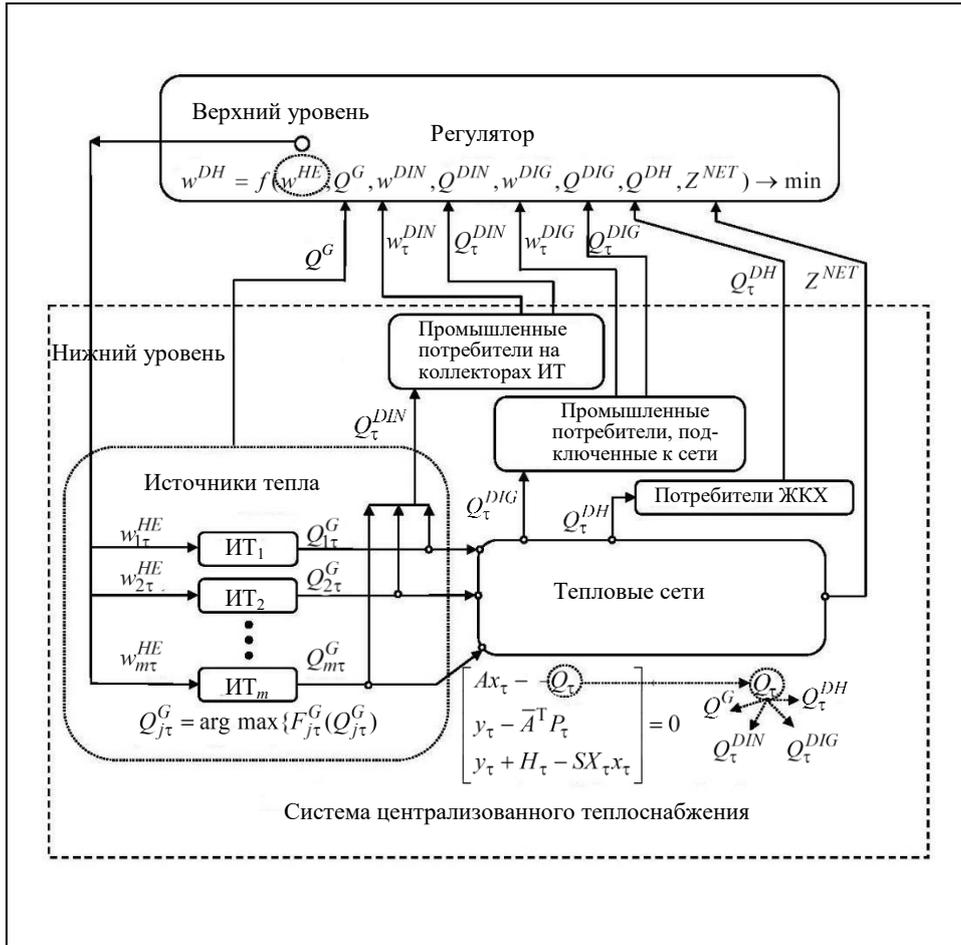
Шаг FV.6. Вычислить цены w_τ^{DIG} и w_τ^{DIN} по формулам обратного спроса.

Шаг FV.7. Вычислить величину $FV(w_\tau^{HE}) = f_\tau \left(w_\tau^{HE}, Q_\tau^G, Z_\tau^{NET}, w_\tau^{DIG}, Q_\tau^{DIG}, w_\tau^{DIN}, Q_\tau^{DIN} \right)$, используя формулу (22).

С учетом введенной в рассмотрение функции FV , значения которой находятся по приведенному выше алгоритму, задача (22), (23) может быть переформулирована следующим образом:

$$FV(w_\tau^{HE}) \rightarrow \min,$$

$$\underline{w}_\tau^{HE} \leq w_\tau^{HE} \leq \bar{w}_\tau^{HE}, \quad j \in J_G.$$



Предлагаемый выше алгоритм минимизации целевой функции (22) представляет собой адаптацию метода покоординатного спуска применительно к рассматриваемой задаче [19].

Графическая интерпретация работы предлагаемого алгоритма в виде пошагового вычислительного процесса представлена на рис. 4.

Рис. 4, а иллюстрирует изменение функции цены тепловой энергии для потребителей ЖКХ в зависимости от значения цены производимой ТЭ источниками для теплоснабжающей системы с двумя источниками (см. рис. 2), а рис. 4, б отображает изолинии функции цели, показывающие область изменения цены на тепловую энергию для потребителей ЖКХ при различных комбинациях возможных значений цен производства тепловой энергии ИТ.

Рис. 3. Поток входных и выходных параметров в задаче двухуровневого управления теплоснабжением потребителей

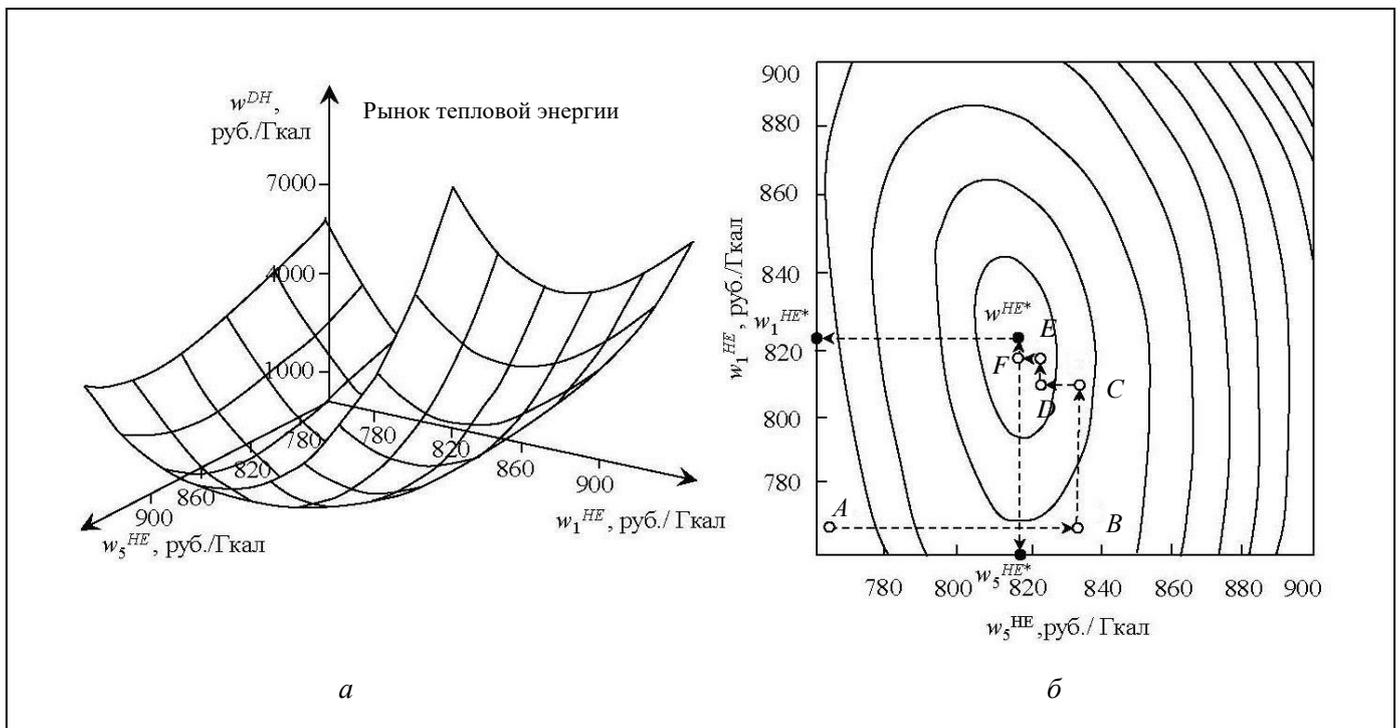


Рис. 4. Графическая интерпретация вычислительного алгоритма



Вычислительный процесс может начинаться, например, в нулевой точке и далее выполняется в направлении убывания функции цены на тепловую энергию, при этом каждый ИТ последовательно оптимизирует свою цену производства ТЭ при заданном (зафиксированном) значении цены производства ТЭ другим ИТ. Оптимальное решение задачи по определению значения цены производства тепла источниками, которое удовлетворяет условию минимальной цены на тепловую энергию для потребителей ЖКХ в рассматриваемой теплоснабжающей системе, достигается уже на пятой итерации и отмечено точкой w^{HE*} , а траектория вычислительного процесса изображена на рис. 4, б в виде ломаной $A-B-C-D-E-F-w^{HE*}$.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Расчеты выполнялись для теплоснабжающей системы г. Ангарска, которая в укрупненном виде состоит из 1273 участков и 1242 узлов (рис. 5).

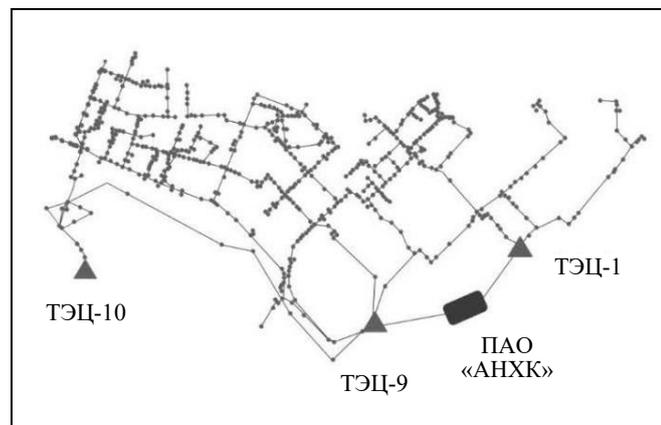


Рис. 5. Расчетная схема теплоснабжения г. Ангарска

Число обобщенных потребителей на схеме представлено 534 узлами, из них 533 узла соответствуют потребителям с фиксированными тепловыми нагрузками (потребители ЖКХ), и один узел – Публичному акционерному обществу «Ангарская нефтехимическая компания» (ПАО «АНХК»), расположенному на коллекторах ТЭЦ-1 и ТЭЦ-9. В качестве исходных данных были приняты: схема теплоснабжения г. Ангарска с техническими характеристиками (диаметры, длины, сопротивления) участков тепловой сети, места расположения источников тепловой энергии в теплоснабжающей системе, функции затрат источников тепла, темпе-

ратурный график, климатические характеристики региона, расчетные тепловые нагрузки потребителей ЖКХ, функция спроса на тепловую энергию ПАО «АНХК».

Расчеты выполнялись для временного интервала длиной в один год с шагом в один час. Расчетные интегральные показатели теплоснабжающей системы г. Ангарска представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные интегральные технико-экономические показатели теплоснабжающей системы г. Ангарска

Наименование показателей	Значение
Объем производства тепловой энергии, млн Гкал, в том числе:	6,85
ТЭЦ-1	1,55
ТЭЦ-9	3,92
ТЭЦ-10	1,38
Затраты на производство тепловой энергии (топливные), млрд руб. в том числе:	3,30
ТЭЦ-1	0,78
ТЭЦ-9	1,91
ТЭЦ-10	0,61
Затраты условно-постоянные (эксплуатационные), млрд руб., в том числе:	2,19
ТЭЦ-1	0,43
ТЭЦ-9	1,05
ТЭЦ-10	0,71
Стоимость производства тепловой энергии, руб./Гкал:	
ТЭЦ-1	647,6
ТЭЦ-9	646,8
ТЭЦ-10	649,7
Цена за единицу мощности, руб./Гкал	
ТЭЦ-1	29,4
ТЭЦ-9	36,0
ТЭЦ-10	42,3
Прибыль, млрд руб., в том числе:	1,02
ТЭЦ-1	0,22
ТЭЦ-9	0,62
ТЭЦ-10	0,18
Затраты тепловых сетей, млрд руб.	1,22
Цена тепловой энергии для потребителей ЖКХ, руб./Гкал	862,7
Цена тепловой энергии для ПАО «АНХК», руб./Гкал	1350,5
Объем потребления тепловой энергии АНХК, млн Гкал	2,10
Объем потребления тепловой энергии потребителями ЖКХ, млн Гкал	4,75

Из табл. 3 видно, что при организации теплоснабжения потребителей в рамках ЕТО ТЭЦ-9 покрывает 57,3 % от суммарной тепловой нагрузки, доля ТЭЦ-1 составляет 22,6 %, ТЭЦ-10 – 20,1 %. Основным потребителем тепловой энергии в г. Ангарске является сектор ЖКХ, на него приходится 69,3 % всего произведенного тепла в СЦТ г. Ангарска и 30,7 % тепла потребляют технологические объекты ПАО «АНХК».

Среднегодовой минимальный тариф для потребителей ЖКХ составит 862,7 руб./Гкал (без НДС), а для ПАО «АНХК» – 1350,5 руб./Гкал. Суммарная выручка ЕТО от продажи ТЭ потребителям составит 5,65 млрд руб., а суммарная прибыль источников тепловой энергии за рассмотренный период – 1,22 млрд руб. из которых 0,22 млрд руб. приходится на ТЭЦ-1, 0,62 млрд руб. – на ТЭЦ-9 и 0,18 млрд руб. – на ТЭЦ-10. Затраты на транспортировку тепловой энергии (затраты в тепловые сети) составили 1,22 млрд руб., что соответствует удельному значению в размере около 178,1 руб./Гкал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены:

- новая постановка задач развития систем централизованного теплоснабжения для организационной модели в виде регулируемого монопольного рынка;
- требования к математическим моделям и методам, применяемым для их решения;
- концептуальные положения взаимодействия участников процесса теплоснабжения потребителей в виде иерархической вертикально интегрированной системы.

На основе этого разработана математическая модель системы централизованного теплоснабжения, функционирующей в рамках двухуровневой системы управления, когда регулирующий орган управляет тарифами для потребителей ЖКХ, промышленные потребители покупают тепловую энергию в соответствии с функцией спроса, а источники тепловой энергии покрывают заданный суммарный спрос со стороны потребителей исходя из условия получения максимальной прибыли. Предложен критерий оптимизации регулятора. С помощью двухуровневого подхода рассчитаны значения технико-экономических показателей теплоснабжающей системы г. Ангарска.

Предлагаемая математическая двухуровневая модель в наибольшей степени отражает реальные условия, формирующиеся на локальных рынках тепловой энергии. Данная модель обоснованно учитывает установившиеся «правила поведения» на рынке тепла, а также физико-технические и экономические ограничения рассматриваемой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Frederiksen, S., Werner, S.* District Heating and Cooling. – Lund: Studentlitteratur, 2013. – 588 p.
2. *Бауммаков А.И.* Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 2. – С. 6-9. [*Bashmakov, A.I.* Analiz osnovnykh tendentsii razvitiya sistem teplosnabzheniya Rossii // Novosti teplosnabzheniya. – 2008. – No. 2. – P. 6–9. (In Russian)]
3. *Wenren, S.* District Heating and Cooling in Sweden // *Energy*. – 2013. – No. 126. – P.419–429.
4. *Belyaev, L.* Electricity Market Reforms: Economics and Policy Challenges. – New York: Springer – Verlag, 2011. – 252 p.
5. *Stoft, S.* Power System Economics: Designing Markets for Electricity. – Wiley-IEEE Press, 2002. – 493 p.
6. *Paiho, S., Saastamoinen, H.* How to Develop District Heating in Finland? // *Energy Policy*. – 2018. – No. 122. – P. 668–676.
7. *Biggara, D., Soderberg, M.* Empirical Analysis of How Political Ideology and Ownership Influence Price Stability in the Swedish District Heating Market// *Energy Policy*. – 2020. – No. 145. – P. 1–7.
8. *Osman, N.* Barriers to District Heating Development in the Netherlands: A Business Model Perspective: Master thesis for Business Administration. – Enschede: University of Twente, 2017. – URL: https://essay.utwente.nl/73054/1/Osman_BA_BMS.pdf.
9. *Wojdyga, K., Chorzelski, M.* Chances for Polish District Heating Systems // *Energy Procedia*. – 2017. – No. 116. – P. 106–118.
10. *District Heating and Cooling, Combined Heat and Power and Renewable Energy Sources.* – URL: <http://basrec.net/wp-content/uploads/2014/06/Appendix%20-%20country%20survey.pdf> (дата обращения 06.02.2021).
11. *Ziemelel, J., Vigants, G., Vitolins, V., Blumberga, D., Veidenbergs, I.* District Heating Systems Performance Analyses. Heat Energy Tariff // *Environmental and Climate Technologies*. – 2014. – No. 13. – P. 32–43.
12. *Sarma, U., Bazbauers, G.* District Heating Regulation: Parameters for the Benchmarking Model // *Energy Procedia*. – 2016. – No. 95. – P. 401–407.
13. *Askeland, K., Bozhkova, K.* District Heating in Norway. An Analysis of Shifting from Individual Electric Heating to District Heating: Master's Thesis. – Aalborg: Aalborg University, 2017. – URL: https://projekter.aau.dk/projekter/files/260084106/Master_thesis_Askeland_Bozhkova.pdf.
14. *Šommet, J.* Sustainable Development in Estonian Mining // *Environmental and Climate Technologies*. – 2013. – No. 11. – P. 34–40.
15. *Jing, Lin, Boqiang, Lin.* Heat Tariff and Subsidy in China Based on Heat Cost Analysis // *Energy Economics*. – 2018. – No. 71. – P. 411–420.



16. *Dempe, S.* Foundations of Bi-level Programming. – Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 318 p.
17. *Стенников В.А., Пеньковский А.В., Хамисов О.В.* Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников тепла // Проблемы управления. – 2017. – № 1. – С. 10–18. [*Stennikov, V.A., Penkovskii, A.V., Khamisov, O.V.* Search for Cournot Equilibrium on the Heat Energy Market in the Conditions of Heat Sources Competitive Behaviour / Control Sciences. – 2017. – No. 1. – P. 10–18. (In Russian)]
18. *Меренков А.П., Хасилев В.Я.* Теория гидравлических цепей. – Москва: Наука, 1985. – 294 с. [*Mererkov, A.P., Khasilev, V.Ya.* Theory of Hydraulic Circuits. – Moscow: Nauka, 1985. – 294 p. (In Russian)]
19. *Shoup, E.* A practical Guide to Computer Methods for Engineers. – England: Prentice-hall, 1979. – 255 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Поступила в редакцию 9.04.2021,
после доработки 13.04.2022.
Принята к публикации 13.04.2022.

Стенников Валерий Алексеевич – д-р техн. наук,
✉ SVA@isem.irk.ru,

Хамисов Олег Валерьевич – д-р физ.-мат. наук,
✉ Khamisov@isem.irk.ru,

Пеньковский Андрей Владимирович – канд. техн. наук,
✉ penkoffsky@isem.irk.ru,

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
г. Иркутск.

A MATHEMATICAL MODEL OF MANAGING A REGULATED MONOPOLY DISTRICT HEATING MARKET

V.A. Stennikov¹, O.V. Khamisov², and A.V. Penkovskii³

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹✉ SVA@isem.irk.ru, ²✉ Khamisov@isem.irk.ru, ³✉ penkoffsky@isem.irk.ru

Abstract. This paper formulates an approach to managing the district heating of consumers in a hierarchical two-level system. The upper level is a regulator (e.g., a regional tariff service) that adjusts the heat energy tariff for consumers. The lower level is a district heating system that technologically and organizationally combines heat energy production and transport within a unified heat supply organization. The interaction of all participants in the process of heat supply to consumers is described. Optimization criteria are proposed for the upper and lower levels. A bi-level mathematical model of the district heating system is developed using the theory of hydraulic circuits and bi-level programming. This model operates in the conditions of a regulated monopoly heat energy market. The developed approach is applied to the real district heating system of Angarsk.

Keywords: district heating systems, heat energy market, mathematical modeling, hierarchical management, optimization.

Funding. This work was performed at Melentiev Energy Systems Institute (SB RAS) within state orders FWEU-2021-0002 (registration no. AAA-A21-121012090012-1) and FWEU-2021-0006 (registration no. AAA-A21-121012090034-3) of the fundamental research of SB RAS.

АРБИТРАЖНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СУПЕРВИЗОРОВ КОНФИГУРАЦИЙ

А.М. Агеев, В.Н. Буков, В.А. Шурман

Аннотация. Рассмотрена проблема оперативного реконфигурирования комплекса бортового оборудования, содержащего избыточные неоднородные и неуниверсальные компоненты, с целью одновременного достижения как отказоустойчивости, так и других эксплуатационно-технических характеристик. В качестве концептуального решения сформулирован подход к построению системы управления избыточностью (СУИ), использующий супервизоры конфигураций по числу заранее отработанных конкурентоспособных конфигураций комплекса. Каждый такой супервизор может быть самодостаточен в смысле мониторинга готовности и показателей функциональной эффективности компонентов, входящих в соотнесенную с ним конфигурацию, участия в арбитраже за право реализации в сложившихся условиях соответствующей конфигурации, а также инициализации и контроля функционирования этой конфигурации. Предложен трехэтапный алгоритм работы СУИ, содержащий последовательность парных арбитражей вычислителей и конфигураций. Методический пример поясняет работу СУИ в различных режимах работы комплекса, при возникновении обнаруживаемых и необнаруживаемых отказов компонентов оборудования и выделенных для управления избыточностью вычислителей. Изложенные предложения позволяют унифицировать и рационализировать информационно-логическую структуру средств управления избыточностью, упрощая тем самым задачу создания СУИ требуемого уровня эффективности, обеспечивающей гибкость и широту охвата оборудования и конфигураций, а также существенное уменьшение числа узких мест избыточного комплекса.

Ключевые слова: комплекс бортового оборудования, избыточный ресурс, реконфигурирование, управление избыточностью, супервизор конфигурации, парный арбитраж.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие отечественного авиационного приборостроения должно в максимальной степени отвечать вызовам, обусловленным как генеральными тенденциями развития мировой авиации, так и условиями, особенностями и целевыми установками отечественного авиастроения. Среди главных направлений развития авиации [1–4] видное место занимает создание предельно надежных авиационных комплексов бортового оборудования (КБО), обладающих широким диапазоном возможностей и высокой конкурентоспособностью как на отечественном, так и на мировом рынках. В условиях объективно ограниченной надежности элементной базы [5] безальтернативным путем достижения

указанного эффекта является создание реконфигурируемых избыточных¹ КБО, позволяющих удовлетворить требование по отказоустойчивости посредством использования системных свойств КБО.

Вопрос поиска рациональных путей проектирования систем реконфигурирования для бортовых авиационных применений является весьма актуальным, о чем свидетельствует большой объем работ как в нашей стране [6–9], так и за рубежом [10–13]. К традиционным решениям в области реконфигурирования можно отнести технологию

¹ Под избыточностью технической системы понимается наличие в ней возможностей сверх тех, которые могли бы обеспечить ее нормальное функционирование [5].



FDIR² (*Fault-Detection, Fault-Isolation and Recovery Techniques*), подразумевающую резервирование конфигураций целиком, и покомпонентное резервирование [7, 8], относящееся в основном к однотипным по конструкции и функциям частям системы. Кроме того, известны разработки и более продвинутых подходов, к которым можно отнести, например, распределение функциональных задач между доступными аппаратными ресурсами многопроцессорных комплексов [9] и использование принципа мультиагентного взаимодействия бортовых вычислителей на основе локальных диспетчеров [14].

Вместе с тем общим ограничением указанных подходов является их узкая ориентированность на конкретный вид управляемых ресурсов и сосредоточенность исключительно на отказоустойчивости, в то время как для пользователей систем с избыточностью разнородного оборудования представляет интерес не только предельно достижимая отказоустойчивость таких систем, но и обеспечение других эксплуатационно-технических характеристик, предпочтительных в сложившихся условиях.

В настоящей статье предлагается развитие подхода [15] к управлению избыточностью с большей гибкостью в отношении разнородности и универсальности компонентов оборудования и большими возможностями достижения требуемых интегральных характеристик комплекса.

1. КОНФИГУРАЦИИ ИЗБЫТОЧНЫХ РЕСУРСОВ

Предметной областью применения подхода к управлению избыточностью, предлагаемого в настоящей статье, являются все компоненты избыточного КБО, под которыми будем понимать информационно обособленные устройства (узел, подсистема, система и пр.) или программные продукты (модуль, приложение), доступ к данным которых возможен только через соответствующие входы и выходы. Каждый компонент неделим в смысле прохождения потоков данных. Совокупность компонентов, выполняющих одинаковые или взаимозаменяемые (с точностью до реализуемой компонентом эффективности) функции, составляет соответствующий *избыточный ресурс*.

Для использования комплекса по назначению в каждый данный момент должна действовать специальная минимально достаточная работоспо-

собная совокупность аппаратных и/или программных компонентов КБО, называемая *конфигурацией*. Будем считать, что любая работоспособная конфигурация использует по крайней мере по одному компоненту из каждого ресурса.

При этом организация резервирования компонентов [7] зачастую сталкивается с особенностями, поясняемыми на рис. 1, где показаны следующие характерные случаи:

а) случай однородных по интерфейсам и универсальных по возможностям компонентов в составе каждого ресурса;

б) наличие неоднородных компонентов в составе того или иного ресурса, когда возникает барьер, непреодолимый для межкомпонентных связей, и замена компонентов в одном ресурсе требует соответствующей замены компонентов в другом (смежном) ресурсе;

в) влияние неуниверсальности компонентов на возможности реконфигурирования комплекса, при котором каким-либо образом сужается круг допустимых альтернативных конфигураций.

Принципиальным является то, что указанные обстоятельства могут сделать невозможным или неэффективным выбор альтернативных (замещающих) компонентов исключительно внутри ресурса. Для эффективного управления избыточностью может потребоваться рассмотрение альтернатив между группами ресурсов, а в пределе – между конфигурациями целиком.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем исходить из того, что избыточный КБО представлен совокупностью K разнородных (различные возможности соединений) и неуниверсальных (различные выполняемые функции) информационно обособленных компонентов, разбиваемых в силу различных обстоятельств на группы K_i ресурсов:

$$k_{i,j} \in K_i, \quad K_i \subset K, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N_i}, \quad (1)$$

где $k_{i,j}$ – j -й компонент в i -й группе; N – количество групп ресурсов в КБО; N_i – количество компонентов в i -й группе.

Каждому компоненту $k_{i,j}$ ставится в соответствие пара таких показателей, как индекс готовности ИГ _{$k_{i,j}$} и показатель функциональной эффективности ПФЭ _{$k_{i,j}$} . Бинарное значение первого из них (1 – готов, 0 – не готов) соответствует совокупной оценке системой мониторинга его готовности

² URL: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/422452> (дата обращения 01.11.2020).

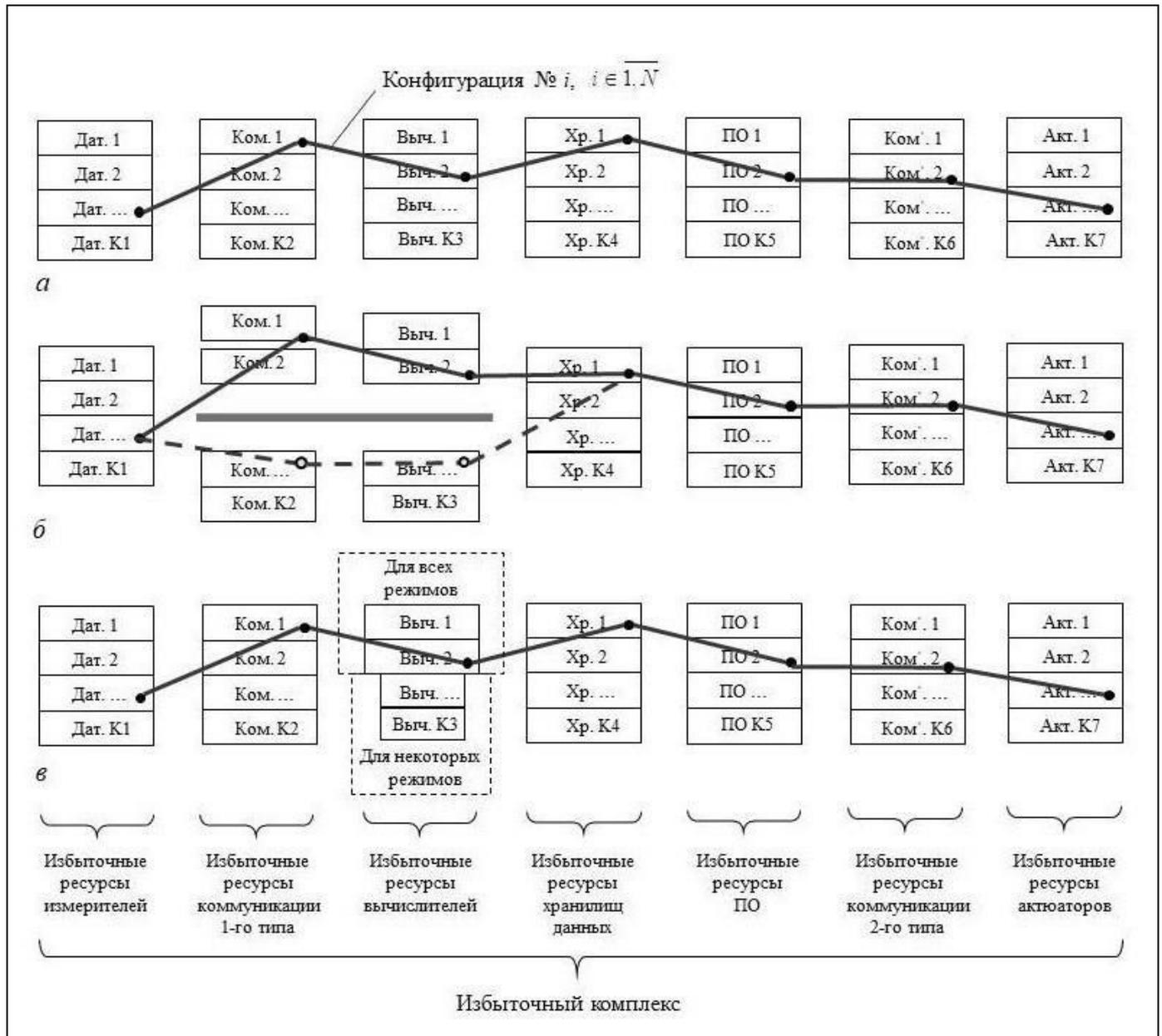


Рис. 1. Типовой состав избыточного комплекса оборудования: *а* – с однородными универсальными компонентами, *б* – с неоднородными компонентами, *в* – с неуниверсальными компонентами

(работоспособности и завершенности всех предусмотренных подготовительных процедур) посредством встроенных средств контроля (ВСК), а действительное скалярное значение второго интегрально характеризует потенциальный вклад компонента в целевую функцию определенного режима КБО. Предусматриваются возможности априорного и текущего (по результатам мониторинга и внешнего целевого воздействия) определения актуальных значений как ИГ $_{i,j}$, так и ПФЭ $_{i,j}$.

Кроме того, в состав КБО входит бортовая интегрированная вычислительная среда (БИВС), формально не относящаяся к компонентам и осу-

ществляющая межкомпонентный обмен данными, а также обработку этих данных в соответствии с предусмотренными правилами. Вычислители БИВС, обозначаемые как v_r , тоже представлены в избытке:

$$v_r \in V, \quad r = \overline{1, R}, \quad (2)$$

где V – совокупность вычислителей³, привлекаемых для управления избыточностью КБО, общим

³ Вычислители, как и коммуникационные средства, могут обладать различными характеристиками, тогда необходимы соответствующие модификации последующих формулировок.



количеством R , каждому из которых ставится в соответствие ИГ $_r$ с бинарным значением (1 – готов, 0 – не готов).

Для выполнения функций КБО по предназначению его компоненты объединяются средствами БИВС в различные работоспособные конфигурации

$$m_q = m_q(k_{1*}, k_{2*}, \dots, k_{N*}, a_q), \quad (3)$$

$$m_q \in M, q = \overline{1, Q},$$

где $*$ – номер входящего в q -ю конфигурацию компонента из каждой группы ресурсов; a_q – совокупный процесс обработки данных вычислительными средствами БИВС в q -й конфигурации комплекса; M – ограниченное множество конфигураций; Q – количество различных конфигураций в множестве M . Без потери общности подхода принято, что любая конфигурация КБО включает по одному компоненту из каждой группы ресурсов, а проблемы неоднородности и неуниверсальности компонентов преодолеваются заблаговременной проработкой всех конкурентоспособных конфигураций на этапе проектирования СУИ.

Для каждой потенциальной конфигурации (3) по определенным правилам формируются интегральные показатели:

– ИГ конфигурации как конъюнкция ИГ составляющих компонентов

$$\text{ИГ}(m_q) = \text{ИГ}_{1*} \wedge \text{ИГ}_{2*} \wedge \dots \wedge \text{ИГ}_{N*}, \quad (4)$$

– ПФЭ конфигурации как результат агрегирования ПФЭ составляющих компонентов

$$\text{ПФЭ}(m_q) = \wp(\text{ПФЭ}_{1*}, \text{ПФЭ}_{2*}, \dots, \text{ПФЭ}_{N*}), \quad (5)$$

где \wp – скалярная функция, в качестве которой в зависимости от особенностей компонентов и других обстоятельств могут использоваться различные способы агрегирования показателей (суммирование, умножение, выбор характерных значений, использование инструментов искусственного интеллекта типа регуляризации, нормализации, свертки, включая сети с глубоким обучением [16] и пр.).

Ставится задача разработки подхода (согласованной совокупности алгоритмов, методик и приемов), обеспечивающего оперативный выбор из прямого произведения множеств вычислителей и конфигураций $V \times M = \{v_r, m_q\}_{r,q}$ предпочтительного элемента $(v_\alpha, m_{\text{opt}})$, содержащего:

• вычислитель v_α (в дальнейшем будем называть его α -вычислителем) для осуществления

управления избыточностью, характеризуемый значениями

$$v_\alpha = \text{opt}_{v_r} \begin{cases} \text{ИГ}(v_r) = 1, \\ \text{отсутствие ошибок} \\ \text{подготовки конфигурации } m_{\text{opt}}; \end{cases} \quad (6)$$

• готовую к реализации предпочтительную конфигурацию m_{opt} , у которой значения интегральных показателей имеют оптимальные (рациональные) значения

$$m_{\text{opt}} = \text{opt}_{m_q} \begin{cases} \text{ИГ}(m_q) = 1, \\ \text{ПФЭ}_{\max} = \max_{m_q \in M} \text{ПФЭ}(m_q). \end{cases} \quad (7)$$

Второе условие в выражении (6) подразумевает проверку определенной совокупности признаков того, что сформированные в вычислителе v_α данные о выбранной по формуле (7) конфигурации m_{opt} отвечают предъявляемым требованиям (валидация конфигурации).

Предполагается, что при наличии нескольких конфигураций с максимальным значением ПФЭ такие конфигурации эквивалентны, а окончательный выбор может осуществляться по предусмотренным дискриминационным правилам.

Удовлетворение выражения (6) и первого равенства в формуле (7) соответствует отказоустойчивости КБО в целом, а второго – одновременному достижению его оптимальных (рациональных) эксплуатационно-технических характеристик, формализуемых посредством ПФЭ. Гибкость соответствующего подхода обусловлена широкими возможностями выбора или конструирования функции \wp , что выходит за рамки данной статьи.

3. СУПЕРВИЗОРЫ КОНФИГУРАЦИЙ

Центральным понятием предлагаемого подхода является понятие *супервизора конфигурации* [15]. При этом с каждой конкурентоспособной конфигурацией m_q соотносится свой супервизор конфигурации $СК_q$ из множества S , взаимно однозначно соответствующего множеству M :

$$m_q \in M \leftrightarrow s_q \in S,$$

осуществляющий «надзор» исключительно над этой конфигурацией, что подразумевает:

• проведение мониторинга ИГ $_{i,j}$ и ПФЭ $_{i,j}$ компонентов (1), охватываемых конфигурацией, и

всех вычислителей (2), а также формирование ИГ(m_q) и ПФЭ(m_q) конфигурации в целом в соответствии с выражениями (4) и (5);

- хранение информации о конфигурации: о взаимных связях компонентов, распределении ресурсов, а также других данных, необходимых для ее реализации⁴;

- участие в периодическом конкурсе (межсупервизорном арбитраже) на выявление предпочтительной конфигурации m_{opt} в соответствии с правилом (6), в результате которого соотнесенный СК приобретает статус доминирующего СК (ДСК):

$$s_{opt} \leftrightarrow m_{opt};$$

- для ДСК, победившего в арбитраже, дополнительно:

- мониторинг ИГ(v_r) вычислителей;
- проведение арбитража вычислителей (2) на выявление среди них α -вычислителя v_α ;
- валидацию конфигурации m_{opt} , соотнесенной с ДСК s_{opt} ;
- активизацию и контроль функционирования конфигурации m_{opt} ;

- координацию всех процедур управления избыточностью КБО.

Рис. 2 иллюстрирует место и роль совокупности СК в общей архитектуре КБО.

Таким образом, каждый СК, являясь «полномочным представителем» соотнесенной с ним конфигурации, выполняет весь набор функций по оценке ее готовности, хранению соответствующей информации, представительству в арбитраже и активизации в случае победы.

Предлагаемый подход во многом схож с мультиагентным подходом на базе распределенного локального диспетчера [14], однако отличается от него возможностью обеспечить:

- достижение отказоустойчивости не только вычислительных ресурсов, но всего разнородного и неуниверсального оборудования комплекса;
- парирование ошибок средств мониторинга готовности конфигураций путем перекрестного анализа информационных посылок предпочтений при выполнении парного арбитража конфигураций⁵ (ПАК);
- парирование необнаруживаемых (использованием ВСК) отказов и ошибок вычислителей посредством анализа информационных посылок

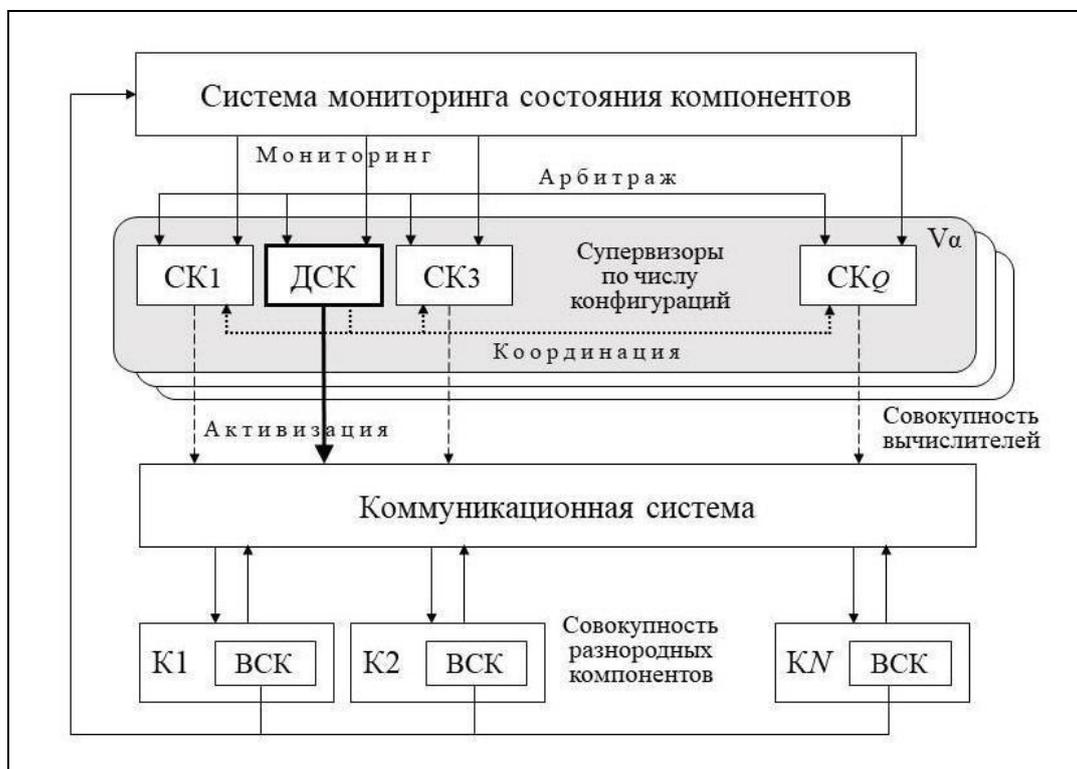


Рис. 2. Место и роль супервизоров конфигураций в архитектуре КБО

⁴ Методы формирования и способы хранения информации о конфигурациях приведены в работе [17].

⁵ Описание процедуры парного арбитража конфигураций выходит за рамки данной публикации



предпочтений при выполнении парного арбитража вычислителей⁶ (ПАВ);

- одновременное достижение различных эксплуатационно-технических показателей;
- самодостаточность супервизоров (резервирование всех процедур управления избыточностью);
- унификацию средств поддержки конфигураций;
- унификацию процедур выбора среди различных по структуре и составу конфигураций.

4. ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ КБО

Область $V \times K$ поиска решений содержит конечное, возможно, значительное, число комбинаций RQ вычислителей v_r и конфигураций m_q . Кроме того, потенциальные решения (v_r, m_q) могут обладать различными техническими характеристиками из весьма широкого перечня. Поэтому наиболее эффективным способом поиска предпочтительного решения представляется рафинированный⁷ сравнительный перебор всех возможных решений.

Для скалярных критериев $ИГ(m_q)$ и $ПФЭ_{max}$ достаточно универсальным и приемлемо трудоемким является парный арбитраж супервизоров. Он гарантирует отсутствие закликиваний и однозначность определения лидера (v_α, m_{opt}) . При этом недостаток такого арбитража в виде не обязательно приоритетного распределения остальных решений (v_r, m_q) , $r \neq \alpha$, $q \neq opt$ в данном случае не критичен, поскольку по постановке задачи требуется только конфигурация-лидер.

С учетом размещения всех СК s_q в каждом вычислителе v_r , исключения априорных преимуществ каких-либо вычислителей и конфигураций, а также определенной взаимосвязанности правил (6) и (7) для системы управления избыточностью (СУИ) КБО предлагается алгоритм, представленный на рис. 3. Его специфической особенностью является очередность выполнения трех этапов арбитража.

⁶ Описание процедуры парного арбитража вычислителей выходит за рамки данной публикации.

⁷ Исключающий повторы и неоднозначности шагов.

Первый этап – арбитраж вычислителей (фаза 1), на котором α -вычислитель, выбранный на предыдущем цикле работы системы (а в случае его отказа α -резерв), осуществляет:

- формирование группы готовых вычислителей;
- выбор «выделенной пары» вычислителей, претендующих на статус α -вычислителя;
- предварительный выбор вычислителя-претендента (α -претендента) $v_{прет}$ в выделенной паре на основе детерминированных, возможно дискриминационных, правил. Второй вычислитель пары приобретает статус резерва (α -резерва) $v_{рез}$;
- инициализацию вычислителя $v_{прет}$.

Второй этап – арбитраж супервизоров, на котором в вычислителе $v_{прет}$ происходит:

- последовательный попарный выбор ДСК s_{opt} из совокупности s_q с учетом $ИГ(m_q)$ и $ПФЭ(m_q)$ путем выполнения специальных процедур ПАК;
- инициализация выбранного ДСК s_{opt} (передача функций управления);
- передача из вычислителя $v_{прет}$ в вычислитель $v_{рез}$ информации о выбранном ДСК s_{opt} , где он принимает имя $s_{opt,рез}$.

Третий этап – арбитраж вычислителей (фаза 2), на котором вычислители выделенной пары осуществляют:

- окончательный выбор α -вычислителя v_α на основе процедур ПАВ: $v_{прет} \rightarrow v_\alpha$ или $v_{рез} \rightarrow v_\alpha$;
- в случае $v_{рез} \rightarrow v_\alpha$ инициализацию вычислителя $v_{рез}$ (переход к резервному вычислителю);
- в случае $v_{рез} \rightarrow v_\alpha$ инициализацию ДСК $s_{opt,рез} \rightarrow s_{opt}$ в вычислителе $v_{рез}$ (переход к супервизору в резервном вычислителе);
- инициализацию выбранной конфигурации $s_{opt} \rightarrow m_{opt}$ посредством ДСК s_{opt} в α -вычислителе (остановка прежней и запуск новой конфигурации на очередной цикл работы КБО).

Работа СУИ происходит циклично. При этом на каждом цикле процедурам арбитража предшествует мониторинг, обеспечивающий формирование $ИГ(m_q)$ и $ПФЭ(m_q)$ конфигураций применительно к сложившимся условиям функционирования КБО. По завершении арбитража и активизации победившей конфигурации m_{opt} выполняются целевые

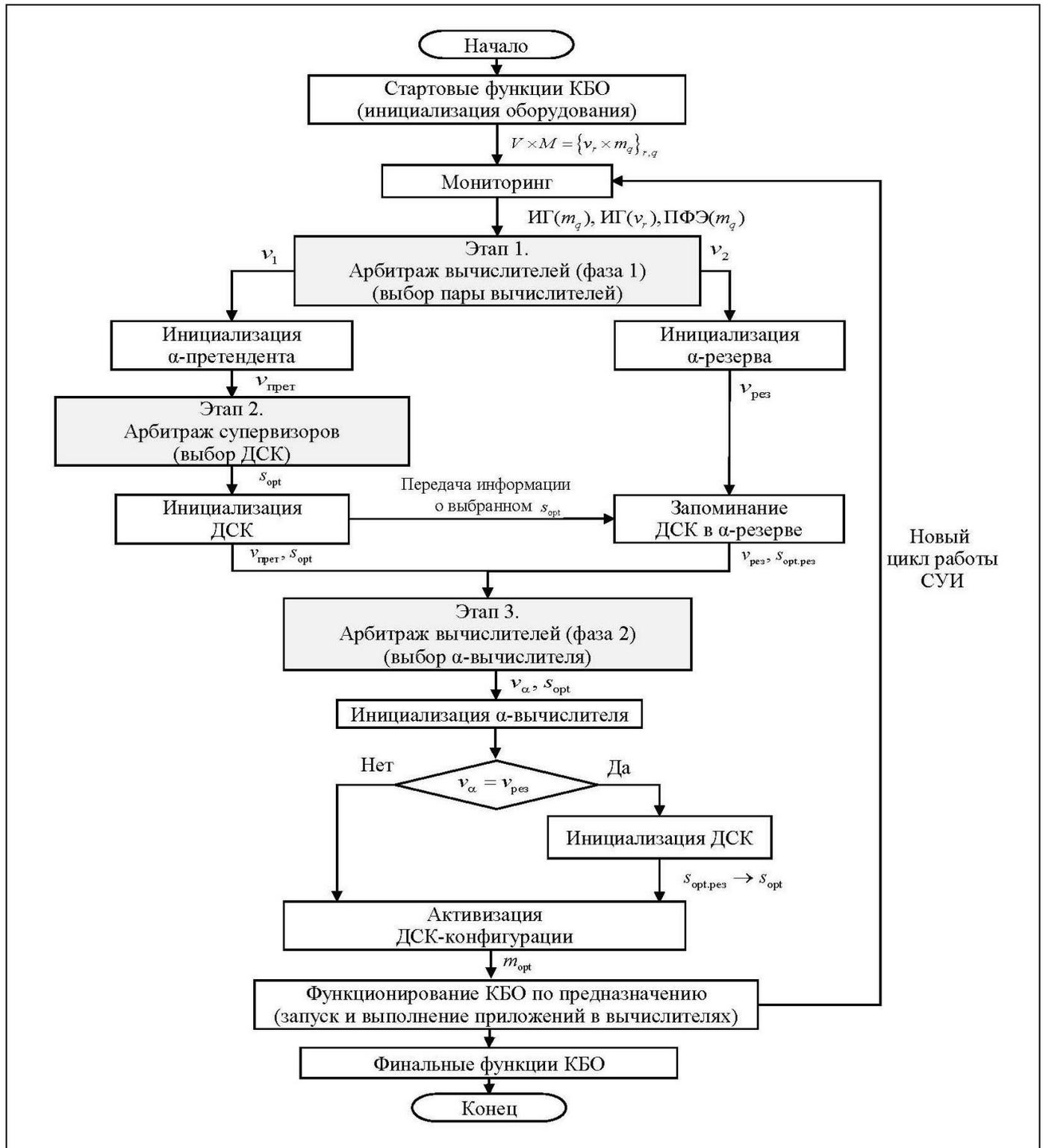


Рис. 3. Алгоритм организации работы СУИ

функции КБО согласно назначению, и через определенное время или по факту обнаружения отказа (смены режима работы КБО) начинается новый цикл работы СУИ.

Проигрыш вычислителя или конфигурации в арбитраже текущего цикла, идентифицированных

как неготовые или обладающие меньшей эффективностью, не означает их безоговорочное исключение из дальнейшей работы. Таким образом допускается возможность восстановления готовности компонентов в другом режиме или после снятия отказа (перезагрузки), кроме того, «слабая» конфи-

гурация может оказаться решающей в критической ситуации. Выработка различных решений по отношению к сбоям и постоянным отказам возлагается на систему мониторинга и межвычислительного обмена и выносятся за рамки настоящей статьи.

Указанные выше процедуры ПАК и ПАВ основаны на взаимно-перекрестном анализе информационных посылок предпочтения (в первом случае – супервизоров, а во втором – вычислителей), что обеспечивает заданную достоверность арбитража. Критерием определения отказавших объектов арбитража являются матрицы предпочтения, сформированные на основе ИГ, ПФЭ и идентификаторов. Детали указанных процедур требуют отдельного рассмотрения.

5. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

Рассмотрим гипотетический КБО, состоящий из шести компонентов К1, ..., К6, разбитых на три

последовательные группы ресурсов. Первые две группы представлены в избытке (два и три компонента). Соответствующую схему в пяти поясняемых далее ситуациях иллюстрируют рис. 4 и таблица. Вычислительные средства БИВС включают в себя три одинаковых вычислителя V1, V2 и V3, в каждом из которых размещены шесть СК по числу предусмотренных конфигураций согласно таблице. Управляемые супервизорами два коммутатора С1 и С2 обеспечивают соединение компонентов комплекса в соответствии с данными конфигурациями. Кроме того, предусмотрены два режима работы КБО, характеризуемые различными значениями ПФЭ конфигураций.

Типовые ситуации:

А) *Штатная работа КБО.*

Реализуется режим 1, все компоненты исправны (см. рис. 4, а). При штатной работе КБО (отсутствии отказов и смены режимов работы) на первом и последующих циклах работы СУИ выполняются следующие действия.

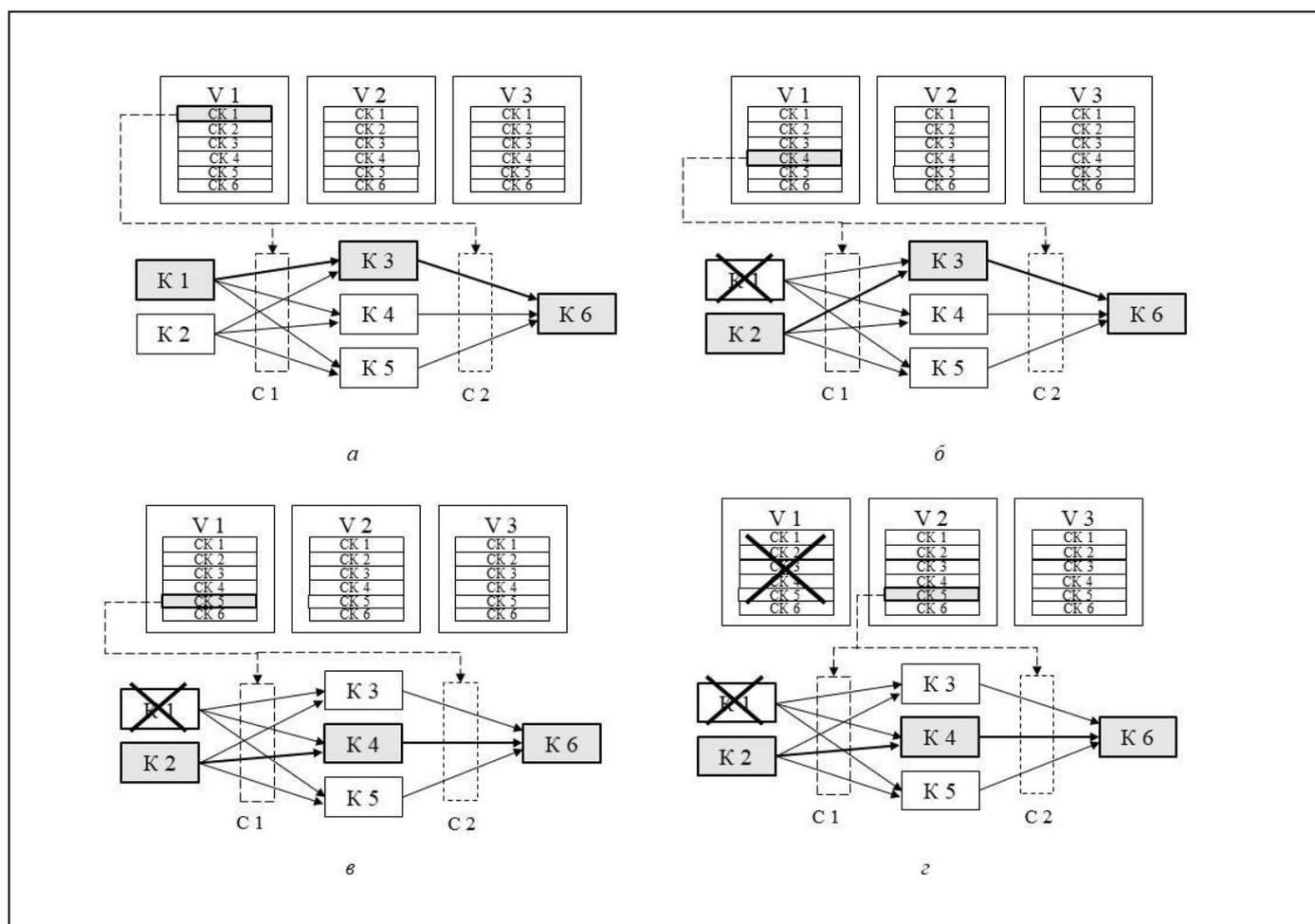


Рис. 4. Структурные схемы избыточного КБО: а – штатная работа в режиме 1, б – отказ компонента К1, в – отказ компонента К1 и переход на режим 2, г – отказ компонента К1, переход на режим 2 и отказ вычислителя V1 (обнаруживаемый или не обнаруживаемый)

Конфигурации КБО

Конфигурации		ИГ компонентов в разных ситуациях												ПФЭ конфигураций	
Номер	Схема соединений	Ситуации А, Д						Ситуации Б, В, Г						Режим 1 (ситуация А, Б)	Режим 2 (ситуация В, Г, Д)
		К1	К2	К3	К4	К5	К6	К1	К2	К3	К4	К5	К6		
1	К1→К3→К6	1	–	1		–	1	0	–	1	–	–	1	6	0,6
2	К1→К4→К6	1	–	–	1	–	1	0	–	–	1	–	1	5	5
3	К1→К5→К6	1	–	–	–	1	1	0	–	–	–	1	1	4	4
4	К2→К3→К6	–	1	1	–	–	1	–	1	1	–	–	1	3	0,3
5	К2→К4→К6	–	1	–	1	–	1	–	1	–	1	–	1	2	2
6	К2→К5→К6	–	1	–	–	1	1	–	1	–	–	1	1	1	1

Первый этап арбитража (выполняется в ДСК α -вычислителя V1, активизированного при старте СУИ по умолчанию):

– в группу готовых вычислителей включаются все три вычислителя V1, V2 и V3;

– в качестве выделенной пары по порядковым номерам выбираются вычислители V1 и V2;

– по порядковому номеру вычислитель V1 объявляется α -претендентом, вычислитель V2 – резервом;

– инициализируется вычислитель V1.

Второй этап арбитража (выполняется в вычислителе V1):

– на основе ПАК в α -претенденте по большему значению ПФЭ в качестве ДСК выбирается супервизор СК 1;

– инициализируется супервизор СК 1;

– информация о выбранном супервизоре СК 1 передается из вычислителя V1 в вычислитель V2.

Третий этап арбитража:

– на основе ПАВ между вычислителями V1 и V2 в качестве α -вычислителя выбирается V1;

– вычислитель V1 сохраняется активным;

– в вычислителе V1 сохраняется активным супервизор СК 1;

– супервизор СК 1 в вычислителе V1 инициализирует конфигурацию № 1.

Б) Отказ компонента КБО.

Реализуется режим 1, обнаруживаемый ВСК отказ компонента К1 (см. рис. 4, б). На очередном цикле работы СУИ выполняются следующие действия (без повторов формулировок ситуации А).

...

Второй этап арбитража:

– на основе ПАК в α -претенденте по большему значению ПФЭ в качестве ДСК выбирается супервизор СК 4;

– инициализируется супервизор СК 4;

– информация о выбранном супервизоре СК 4 передается из вычислителя V1 в вычислитель V2.

Третий этап арбитража:

...

– на основе ПАВ между вычислителями V1 и V2 в качестве α -вычислителя выбирается V1;

– вычислитель V1 сохраняется активным;

– в вычислителе V1 инициализируется супервизор СК 4;

– супервизор СК 4 в вычислителе V1 инициализирует конфигурацию № 4.

Анализ ситуации показывает, что на этапе ПАК отсеиваются конфигурации, содержащие отказавший компонент К1 по условию ИГ₁ = 0. Выбранная в итоге конфигурация № 4 парирует возникший отказ компонента К1, задействуя резервный (альтернативный) компонент К2.

В) Смена режима КБО.

Комплекс переходит из режима 1 в режим 2, обнаруживаемый ВСК отказ компонента К1 (см. рис. 4, в). На очередном цикле работы СУИ выполняются следующие действия (без повторов формулировок ситуации Б).

...

Второй этап арбитража:

– на основе ПАК в α -претенденте по большему значению ПФЭ в качестве ДСК выбирается супервизор СК 5;

– инициализируется супервизор СК 5;

– информация о выбранном супервизоре СК 5 передается из вычислителя V1 в вычислитель V2, где запоминается в качестве ДСК-резерва.

Третий этап арбитража:

...

– на основе ПАВ между вычислителями V1 и V2 в качестве α -вычислителя выбирается V1;



- вычислитель V1 сохраняется активным;
- в вычислителе V1 инициализируется супервизор СК 5;
- супервизор СК 5 в вычислителе V1 инициализирует конфигурацию № 5.

Анализ ситуации показывает, что победу в ПАК одерживает супервизор СК5, ПФЭ которого ($\text{ПФЭ}_{\text{СК5}} = 2$) теперь оказывается больше, чем пониженный при смене режима $\text{ПФЭ}_{\text{СК4}} = 0,2$. По окончании цикла реализуется соответствующая ДСК конфигурация № 5, меняющая выполняемый комплексом функционал, адаптируя его к смене режима.

Г) Обнаруживаемый отказ вычислителя.

Реализуется режим 2, обнаруживаемые ВСК отказы компонента К1 и вычислителя V1 (см. рис. 4, г). При обнаружении ВСК отказа вычислителя V1 на очередном цикле работы СУИ функции УИ передаются резервному вычислителю V2, в котором выполняются следующие действия (без повторов формулировок ситуации В).

Первый этап арбитража:

- в группу готовых вычислителей включаются два оставшихся исправных вычислителя V2 и V3;
- в качестве выделенной пары выбираются оба вычислителя V2 и V3;
- по порядковому номеру вычислитель V2 объявляется α -претендентом, вычислитель V3 – α -резервом;
- инициализируется вычислитель V2.

...

Третий этап арбитража:

- на основе ПАВ между вычислителями V2 и V3 в качестве α -вычислителя выбирается V2;
- вычислитель V2 инициализируется как α -вычислитель;
- в вычислителе V2 инициализируется супервизор СК 5;
- супервизор СК 5 в вычислителе V2 инициализирует конфигурацию № 5.

Д) Необнаруживаемый отказ вычислителя.

Реализуется режим 2, обнаруживаемый ВСК отказ компонента К1, частичный отказ вычислителя V1 (не обнаруживаемый средствами ВСК, но выявляемый при оценке предпочтений при ПАВ, см рис. 4, з). На очередном цикле работы СУИ выполняются следующие действия (без повторов формулировок ситуации В).

...

Третий этап арбитража:

- на основе ПАВ между вычислителями V1 и V2 в качестве α -вычислителя выбирается V2;
- вычислитель V2 инициализируется как α -вычислитель;

- в вычислителе V2 инициализируется супервизор СК 5;
- супервизор СК 5 в вычислителе V2 инициализирует конфигурацию № 5.

Анализ ситуации показывает, что СУИ может являться дополнительным средством контроля состояния компонентов, выявляя необнаруживаемые средствами ВСК отказы через контролируемые ошибки формирования предпочтительных (ДСК) конфигураций.

Пример поясняет работу системы управления избыточностью на основе супервизоров конфигураций при контролируемых и неконтролируемых отказах компонентов (отказоустойчивость) и смене режима работы КБО (функциональная реконфигурация).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы основные положения подхода к управлению избыточностью КБО на основе супервизоров конфигураций. Число таких супервизоров соответствует числу конкурентоспособных конфигураций КБО, каждый из них обобщает информацию о соотношенной конфигурации, участвует в арбитраже и выполняет все процедуры, обеспечивающие реализацию конфигурации в случае победы в арбитраже.

Такой подход позволяет:

- унифицировать структуры средств управления избыточностью;
- обеспечить гибкость охвата разных, включая уникальные, конфигураций;
- исключить (или существенно уменьшить) число узких мест в структурах, управляющих избыточностью;
- осуществлять выбор работоспособных конфигураций с предпочтительными эксплуатационно-техническими характеристиками.

К потенциальным недостаткам подхода можно отнести чрезмерное увеличение числа конфигураций (числа СК) и связанные с этим ожидаемые сложности сертификации. Однако такая ситуация является объективной, а возможность ее решения выглядит оптимистично. Так, близкая проблема сертификации современных интегрированных КБО, содержащих так называемые виртуальные каналы передачи данных, уже сейчас находит свое решение.

Авторы выражают благодарность А.М. Бронникову, И.Ф. Гамаюнову и А.С. Попову за неоценимый вклад в проработку отдельных аспектов предлагаемого подхода.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алешин Б.С., Бабкин В.И., Гохберг Л.М.* и др. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу: справочное пособие. – М.: Изд. ФГУП ЦАГИ, 2014. – 128 с. [*Aleshin, B.S., Babkin, V.I., Gohberg, L.M., et al.* Forsajt razvitiya aviacionnoj nauki i tekhnologij do 2030 goda i na dal'nejshuyu perspektivu: spravocnoe posobie. – Moscow: Izd. FGUP CAGI, 2014. – 128 p. (In Russian)]
2. *Digital Avionics Handbook*. 3-d ed. / Ed. by C.R. Spitzer, U. Ferrell, T. Ferrell. – London, N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 815 p.
3. *Федосов Е.А.* Основные направления формирования научно-технического задела в области бортового оборудования перспективных воздушных судов // Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских воздушных судов: матер. докладов 4-й Междунар. науч.-практ. конф. – Москва, Жуковский: ГосНИИАС, 2017. – С. 6–14. [*Fedosov, E.A.* Osnovnye napravleniya formirovaniya nauchno-tekhnicheskogo zadela v oblasti bortovogo oborudovaniya perspektivnykh vozдушnykh sudov // Perspektivnye napravleniya razvitiya bortovogo oborudovaniya grazhdanskikh vozдушnykh sudov: mater. dokladov 4th Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – Moskva, Zhukovskii: GoSNIAS, 2017. – P. 6–14. (In Russian)]
4. *Ezhilarasu, C.M., Zakwan, Skaf Z., Jennions, I.K.* The Application of Reasoning to Aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and Opportunities // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2019. – No. 105. – P. 60–73.
5. *Авакян А.А.* Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Тр. МАИ: Электронный журнал. – 2013. – № 65. – С. 1–15. Режим доступа: // <http://trudymai.ru/published.php?ID=35845> (дата обращения 13.09.2021). [*Avakyan, A.A.* Unifitsirovannaya interfeisno-vychislitel'naya platforma dlya sistem integral'noi modul'noi avioniki // Tr. MAI: Ehlektronnyi zhurnal. – 2013. – No. 65. – P. 1–15. URL: // <http://trudymai.ru/published.php?ID=35845> (accessed 13.09.2021). (In Russian)]
6. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-1-2011.* Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Ч. 1. Общие термины в области АИСД. – Москва: Стандартинформ, 2012. [*ISO/IEC 19762-1:2008* «Information Technology – Automatic Identification and Data Capture (AIDC) Techniques – Harmonized Vocabulary – Part 1: General Terms Relating to AIDC», IDT]
7. *Клепиков В.И.* Отказоустойчивость распределенных систем управления. – М.: Золотое сечение, 2014. – 391 с. [*Klepikov, V.I.* Otkazoustoichivost' raspredelennykh sistem upravleniya. – Moscow: Zolotoe sechenie, 2014. – 391 p. (In Russian)]
8. *Тарасов А.А.* Функциональная реконфигурация отказоустойчивых систем. – М.: Логос, 2012. – 151 с. [*Tarasov, A.A.* Funktsional'naya rekonfiguratsiya otkazoustoichivyykh sistem. – Moscow.: Logos, 2012. – 151 p. (In Russian)]
9. *Десярев А.Р., Киселев С.К.* Отказоустойчивые реконфигурирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016. – № 1, Т. 12. – С. 89–99. [*Degtyarev, A.R. Kiselev, S.K.* Otkazoustoichivye rekonfiguriruyushchiesya komplekсы integrirovannoy modul'noi avioniki // Ehlektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy. – 2016. – No. 1, T. 12. – P. 89–99. (In Russian)]
10. *Nicholson, M.* Health Monitoring for Reconfigurable Integrated Control Systems // *Proceedings of the 13th Safety-Critical Systems Symposium*, Southampton, UK. – London: Springer, 2005. – P. 149–62.
11. *Halle, M., Thielecke, F.* Next Generation IMA Configuration Engineering – from Architecture to Application // 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Prague, Czech Republic, 2015. – P. 6B2-1–6B2-13.
12. *Zhiao, Y., Wang, S., Jiapan, F.* IMA Dynamic Reconfiguration Modelling and Reliability Analysis of Tasks Based on Petri Net // *Complex Systems Design & Management*, 2021. – P. 241–251.
13. *Sollock, P.* Reconfigurable Redundancy – The Novel Concept Behind the World's First Two-Fault-Tolerant Integrated Avionics System // *Avionics, Navigation, and Instrumentation*, 2019. pp. 243–246.
14. *Каляев И.А., Мельник Э.В.* Децентрализованные системы компьютерного управления. – Ростов н/Д: Изд. ЮИЦ РАН, 2011. – 196 с. [*Kalyaev, I.A., Mel'nik, E.V.* Detsentralizovannye sistemy komp'yuternogo upravleniya. – Rostov n/D: Izd. YUNTS RAN, 2011. – 196 p. (In Russian)]
15. *Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф.* Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 72–82. [*Ageev A.M., Gamayunov I.F., Bronnikov A.M., Bukov V.N.* Supervisory Control Method for Redundant Technical Systems // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2017. – Vol. 56. – No. 3. – P. 410–419.]
16. *Николенко С., Кадури А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей – СПб.: Питер, 2021. – 476 с. [*Nikolenko, S., Kadurin, A., Arkhangel'skaya, E.* Glubokoe obuchenie. Pogruzhenie v mir neironnykh setei – SPb.: Piter, 2021. – 476 p. (In Russian)]
17. *Агеев А.М.* Принципы хранения и мониторинга информации о конфигурациях в задаче управления избыточностью комплекса бортового оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – № 1. – Т. 31. – С. 45–55. [*Ageev, A.M.* Principles of Storing and Monitoring Configuration Information in the Task of On-Board Equipment Complex Redundancy Managing // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. – 2022. – No. 1, vol. 31. – P. 45–55. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Поступила в редакцию 8.02.2022,
после доработки 21.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.

Агеев Андрей Михайлович – канд. техн. наук, ВУИЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, ✉ e-mail: ageev_bbc@mail.ru,

Буков Валентин Николаевич – д-р техн. наук, АО «НИИАО», г. Жуковский, ✉ e-mail: v_bukov@mail.ru,

Шурман Владимир Александрович – заместитель главного конструктора, Филиал АО «РПКБ», г. Жуковский, ✉ e-mail: vshurman@rpkb.ru.



REDUNDANCY MANAGEMENT OF ONBOARD EQUIPMENT: AN ARBITRATION APPROACH BASED ON CONFIGURATION SUPERVISORS

A.M. Ageev¹, V.N. Bukov², and V.A. Shurman³

¹Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

²Research Institute of Aircraft Equipment, Zhukovsky, Russia

³Ramenskoe Instrument-Making Design Bureau (Branch), Zhukovsky, Russia

¹✉ ageev_bbc@mail.ru, ²✉ v_bukov@mail.ru, ³✉ vshurman@rpkb.ru

Abstract. This paper considers the operational reconfiguration of an onboard equipment complex with redundant heterogeneous and non-universal components for achieving fault tolerance and other operational and technical characteristics. An approach to building a redundancy management system (RMS) is formulated as a conceptual solution. This approach uses configuration supervisors according to the number of previously developed competitive configurations of the complex. Each supervisor can be self-sufficient to execute the following functions: monitor the readiness and functional efficiency indicators of the components included in the corresponding configuration; participate in arbitration for the right to implement the corresponding configuration in current conditions; initiate and control the operation of the corresponding configuration. A three-stage algorithm of the RMS is proposed. It contains a sequence of paired arbitrations of computers and configurations. An illustrative example explains RMS operation in different modes of the complex under detectable and undetectable failures of equipment components and computers allocated for redundancy management. The proposed approach unifies and rationalizes the information and logical structure of redundancy management tools, thereby simplifying the creation of an efficient RMS with flexibility, a wide coverage of equipment and configurations, and a significant reduction of bottlenecks in the redundant complex.

Keywords: onboard equipment complex, redundant resource, reconfiguration, redundancy management, configuration supervisor, paired arbitration.

Acknowledgments. The authors are grateful to A.M. Bronnikov, I.F. Gamayunov, and A.S. Popov for their invaluable contribution to some aspects of the proposed approach.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПРОМИССОМ МЕЖДУ УПРАВЛЯЕМОСТЬЮ И КОМФОРТОМ В МОДЕЛИ ТИПА «ЧЕТВЕРТЬ АВТОМОБИЛЯ»

М. Алхелу, Я. Вассуф, В.В. Серебрянный, А.И. Гаврилов, Е.С. Лобусов

Аннотация. Эффективность подвески транспортного средства обычно оценивается по ее способности обеспечивать максимальный комфорт для пассажиров при передвижении и сохранять непрерывный контакт колес с дорогой. Рассматривается задача управления компромиссом между комфортом и управляемостью в модели системы подвески типа «четверть автомобиля» и ее решение с помощью метода управления с активным подавлением помех (УАПП). Построен адаптивный алгоритм для автоматического управления компромиссом между комфортом и управляемостью в зависимости от параметров УАПП. Идея состоит в том, чтобы использовать сигнал возмущения, оцененный с помощью УАПП, для настройки интересующей области системы. Для подтверждения эффективности предложенного метода адаптивный закон управления протестирован на примере нелинейной гидравлической системы подвески. Кроме того, исследовано влияние амплитуд дорожных возмущений и качества дороги на работу системы. Результаты моделирования показали эффективность и простоту предложенного адаптивного алгоритма.

Ключевые слова: управление активным подавлением помех (УАПП), модель типа «четверть автомобиля» (МЧА), следящий дифференциатор (СД), обратная связь по нелинейной ошибке состояния (ОСНОС), наблюдатель с расширенным состоянием (НРС), схема подавления помех (СПП), пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД), пропорционально-дифференциальный регулятор (ПД), управляемость на дороге, комфорт передвижения, поддержание контакта колеса с дорогой (удержание дороги), градиентное правило MIT (метод адаптивного управления).

ВВЕДЕНИЕ

Подвеска автомобиля, или система подвески, представляет собой набор деталей, узлов и механизмов, которые играют роль связующего звена между кузовом автомобиля и дорогой [1]. Подвеска выполняет следующие функции:

- физически соединяет колеса или оси в сборе с несущей рамой автомобиля;
- передает на опорную раму силы и моменты, возникающие при взаимодействии колес с дорогой;
- обеспечивает необходимый характер движения колес относительно рамы, а также необходимую плавность движения.

Когда автомобиль движется по периодическому профилю с резонансами неподрессоренных масс, могут возникнуть значительные колебания в его вертикальных реакциях на дорожные возмущения.

Работы [2–6] посвящены вибрации в системах подвески автомобилей. До недавнего времени при решении задач повышения плавности хода автомобиля конструкторы ограничивались использованием управляемых подвесок для стабилизации положения кузова автомобиля, главным образом для стабилизации продольного угла – угла тангажа. Это способствует безопасной эксплуатации автомобиля, так как влияет на устойчивость системы. Однако безопасность автомобиля в плане потери устойчивости его движения зависит не только от интенсивности вертикальных, продольно-угловых и поперечно-угловых колебаний подрессоренной массы. С точки зрения безопасности дорожного движения интенсивные вибрации неподрессоренных масс также могут быть чрезвычайно опасными и, следовательно, нежелательными. Потеря устойчивости автомобиля при движении по периодическим неровностям под действием боковой внешней



силы может произойти из-за ослабления вертикальных реакций дороги на колеса автомобиля.

Управляемая подвеска – это тип подвески, который во время движения автомобиля позволяет с помощью специальной системы управления регулировать вертикальное перемещение колес относительно шасси или кузова автомобиля. Регулируемые подвески можно разделить на два класса: активные и полуактивные. Специалисты разработали различные варианты автоматизированных систем подвески, в том числе активные и полуактивные системы на основе пружин [7–10]. В полуактивных подвесках используется тот или иной метод изменения коэффициента демпфирования амортизатора, что позволяет влиять на величину создаваемых им сил. Соответствующие изменения коэффициента демпфирования амортизатора в зависимости от текущего режима движения автомобиля рассчитываются блоком управления на основе информации, полученной от сенсорной системы. Активные подвески используют некоторый тип привода для управления расстоянием между центром колеса и шасси.

Плавность хода автомобиля помогает людям чувствовать себя комфортно внутри него, сводит к минимуму повреждение груза и способна минимизировать усилия водителя, необходимые во время длительных поездок в неудобных автомобилях [11, 12]. Управляемость автомобиля характеризует то, как его колеса реагируют на команды водителя, а также как он движется по трассе или дороге. Об этом обычно судят, наблюдая за поведением автомобиля, особенно во время поворотов, ускорения и торможения, а также по устойчивости автомобиля при движении в установившемся режиме [13].

Проектирование подвески часто является компромиссом между комфортом передвижения и управляемостью на дороге, так как автомобили с жесткой подвеской могут обеспечить лучшую регулировку движений корпуса автомобиля и более быструю реакцию. Аналогичным образом, низкий центр тяжести более удобен для управляемости на дороге, но низкий дорожный просвет ограничивает прогиб подвески, что, в свою очередь, требует применения более жестких пружин [8, 14].

В работе [15] исследован компромисс между комфортом передвижения и управляемостью для внедорожных транспортных средств на трех примерах. Авторы предложили критерии проектирования полуактивной системы подвески, которые могли бы значительно снизить или даже устранить противоречие между комфортом передвижения и управляемостью. Такая система основана на пере-

ключении между жесткой пружиной и режимом с высоким демпфированием (для управления) и мягкой пружиной и режимом с низким демпфированием (для комфорта передвижения). В работе [10] предложена автомобильная активная пневматическая система, отвечающая основным характеристикам управляемости и комфорта. Система активной пневматической подвески основана на наборе уравнений для модели типа «четверть автомобиля», пневматического клапана и пневматической пружины. Принят нелинейный алгоритм управления, основанный на технике «бэкстеппинг» (*backstepping*). В работе [16] предложены и проанализированы регуляторы для улучшения управляемости на дороге и комфорта пассажиров автомобиля. Результаты показывают, что оба регулятора обеспечивают хорошую производительность, но предлагаемый регулятор обладает лучшей производительностью и надежностью.

Вклад настоящей статьи заключается в следующем.

- Предложена новая простая и легко настраиваемая адаптивная система управления, основанная на методе управления активным подавлением помех (УАПП, англ. *active disturbance rejection control* (ADRC)), которая позволяет изменять зону управления в зависимости от уровня дорожных помех.
- Стратегия управления масштабируется с помощью одного параметра планирования и автоматически управляет компромиссом между управляемостью и комфортом в модели типа «четверть автомобиля».
- Предложенный алгоритм управления применен к системе подвески с гидравлическим приводом.
- Несколько примеров моделирования демонстрируют эффективность предлагаемого метода.

1. МОДЕЛЬ ТИПА «ЧЕТВЕРТЬ АВТОМОБИЛЯ»

Линейная система активной подвески показана на рис. 1. Динамика системы описывается уравнениями

$$m_s \ddot{z}_s = -K_s(z_s - z_{us}) - C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) + u,$$

$$m_{us} \ddot{z}_{us} = K_s(z_s - z_{us}) + C_s(\dot{z}_s - \dot{z}_{us}) - K_{us}(z_{us} - z_r) - C_{us}(\dot{z}_{us} - \dot{z}_r) - u,$$

где z_s – перемещение поддресоренных масс; z_{us} – перемещение неподресоренных масс; z_r – дефект

дорожного покрытия; K_s – жесткость пружины; K_{us} – жесткость шины; C_s – коэффициент демпфирования демпфера; $C_{us} \approx 0$ – коэффициент демпфирования шины; u – управляющий сигнал.

Используются такие же значения параметров подвески, как в работе [17]: $K_s = 17765$ Н/м, $K_{us} = 190125$ Н/м, $C_s = 535$ Н·с/м, $m_s = 285$ кг, $m_{us} = 41$ кг. Величина $z_s - z_{us}$ характеризует прогиб подвески, \ddot{z}_s – вертикальное ускорение кузова автомобиля.

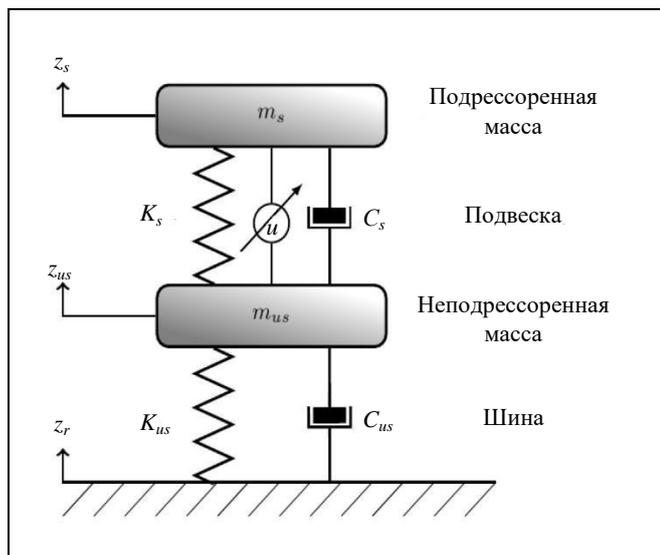


Рис. 1. Линейная активная модель типа «четверть автомобиля»

Комфорт передвижения характеризуется величиной, измеряемой с помощью среднеквадратичного значения (*root mean square, RMS*) вертикального ускорения автомобиля. Чем ниже это значение, тем выше уровень комфорта. С другой стороны, управляемость на дороге характеризуется величиной, которая соответствует продолжительности контакта колеса с поверхностью дороги. Чем больше среднеквадратичное значение прогиба подвески, тем ниже уровень управляемости на дороге.

Существует неизбежное противоречие между комфортом передвижения и управляемостью автомобиля на дороге из-за того, что положение колеса приблизительно соответствует профилю дороги на низких частотах (< 5 рад/с): любое уменьшение хода кузова (вертикальное положение поддрессоренной массы) на этих частотах увеличит прогиб подвески [18]. Чтобы разрешить это противоречие, в настоящей статье рассматривается адаптивная стратегия управления на основе метода УАПШ.

2. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ПОМЕХ

Как указано в работе [10], и управляемость на дороге, и комфорт пассажиров зависят от хода подвески z_s . По мнению авторов, значение хода подвески следует принимать в зависимости от того, какой из двух аспектов должен быть приоритетным. Более того, возможным способом улучшения характеристик подвески является повышение комфорта пассажиров, когда относительное смещение между поддрессоренной и неподдрессоренной массами находится достаточно далеко от границ подвески. С другой стороны, блок управления должен обеспечивать безопасность управления, ограничивая ход подвески.

Чтобы упростить идею, рассмотрим схему управления, показанную на рис. 2. Предполагается, что обратная связь регулятора определяется как $z_s - \alpha z_{us}$, где $\alpha \in [0, 1]$ – параметр настройки. Когда $\alpha = 0$, вход обратной связи равен z_s – это означает, что алгоритм нацелен на минимизацию вертикального смещения поддрессоренной массы. Как следствие, вертикальное ускорение будет сведено к минимуму, обеспечивая необходимый комфорт. Когда значение параметра α увеличивается, значение хода подвески становится больше, и регулятор постепенно отдает приоритет уменьшению хода подвески.

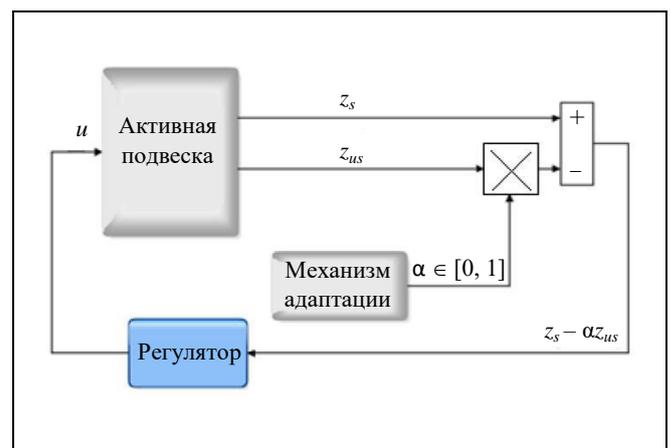


Рис. 2. Предлагаемая схема управления компромиссом между управляемостью и комфортом

В настоящей статье предлагается применить метод УАПШ в качестве регулятора, чтобы воспользоваться его адаптивными возможностями. В этом случае основное внимание будет уделено по-

лучению закона изменения значения параметра α при изменении прогиба подвески.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДА УАПП

Метод УАПП унаследован от пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора и может рассматриваться как надежный метод управления, поскольку он представляет собой всю неизвестную динамику, не включенную в математическую модель управляемой системы, и компенсирует неопределенности моделирования и внешние возмущения в реальном времени [19]. Это заставляет управляемую систему вести себя как интегратор n -го порядка ($1/s^n$, где s – переменная Лапласа, а n выражает порядок сложности системы), который легко управляется регулятором пропорционально-дифференциального (ПД) типа, даже если установка нелинейна и нестационарна. На рис. 3 показана нелинейная структура УАПП, которая состоит из четырех основных блоков: регулятор (обратная связь по нелинейной ошибке состояния (ОСНОС)), наблюдатель с расширенным состоянием (НРС), следящий дифференциатор (СД) и схема подавления помех (СПП).

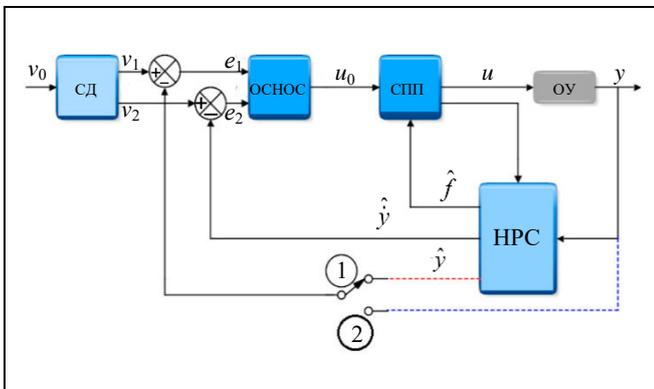


Рис. 3. Схема регулятора УАПП

Метод УАПП не требует точной модели системы и предполагает, что системная динамика может быть выражена в общей форме:

$$\ddot{y} = b_0 u + f, \quad (1)$$

где y – выходной сигнал; u – управляющий вход; f – общие помехи, которые включают в себя внешние и внутренние помехи; b_0 – общий коэффициент усиления регулируемого объекта.

Путем использования СД опорный сигнал сглаживается и генерируются выходные сигналы

для отслеживания опорного сигнала и его дифференциала. Алгоритм заключается в следующем:

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= v_2, \quad \dot{v}_2 = f_{id}(v_1 - v_0, v_2, r_1) = \\ &= -r \operatorname{sign} \left(v_1 - v_0 + \frac{v_2 |v_2|}{2r_1} \right), \end{aligned}$$

где v_0 – желаемый вход; v_1 – сигнал отслеживания системы; v_2 – дифференциальный сигнал системы; r_1 – параметр, определяющий скорость отслеживания. Нелинейная функция f_{id} предлагается в работе [19] для обеспечения максимально быстрого отслеживания опорного сигнала и его производной с учетом предела ускорения r_1 . Параметр r_1 зависит от приложения и настраивается соответствующим образом для ускорения или замедления переходного процесса.

Для оценки динамики системы используется обычный НРС, который оценивает $\hat{y} \approx y$, $\dot{\hat{y}} \approx \dot{y}$ и $\hat{f} \approx f$, включающие в себя внешние возмущения и внутренние динамические неопределенности. НРС используется для мониторинга производительности и прогнозирования состояния установки в режиме реального времени. Этот процесс описан в работе [19]:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}} &= z_1 - y, \quad \dot{z}_1 = z_2 + \alpha_1 \hat{e}, \\ \dot{z}_2 &= z_3 + \alpha_2 |\hat{e}|^{1/2} \operatorname{sign}(\hat{e}) + \hat{b}_0 u, \\ \dot{z}_3 &= \alpha_3 |\hat{e}|^{1/4} \operatorname{sign}(\hat{e}), \end{aligned}$$

где y – выход системы; z_1 – сигнал отслеживания; \hat{e} – расчетная погрешность; z_2 – дифференциальный сигнал; z_3 – сигнал отслеживания общих помех; α_1 , α_2 и α_3 – оценочные коэффициенты; u – управляющий вход; \hat{b}_0 – системный коэффициент, который представляет собой оценочное значение усиления b_0 .

Обратная связь по нелинейной ошибке состояния – это нелинейная стратегия управления, которая может повысить точность системы управления. Она описана в работе [19]:

$$\begin{aligned} \hat{e}_1 &= v_1 - z_1, \quad \hat{e}_2 = v_2 - z_2, \\ u_0 &= \beta_1 f_{nl}(\hat{e}_1, \gamma_1, \eta) + \beta_2 f_{nl}(\hat{e}_2, \gamma_2, \eta), \quad (2) \\ u &= \frac{u_0 - z_3}{b_0}, \end{aligned}$$

где \hat{e}_1 – вычисленная системная ошибка; \hat{e}_2 – оцененный дифференциал системной ошибки; β_1 и β_2 – коэффициенты усиления; функция f_{nl} должна обеспечивать хорошую эффективность управления и высокочастотное переключение между режимами, и ее можно выбрать, как в работе [19]:

$$f_{nl}(e, \gamma, h) = \begin{cases} \frac{e}{\eta^{\gamma-1}}, & |e| \leq \eta, \\ |e|^\gamma \text{sign}(e), & |e| > \eta. \end{cases}$$

Отметим, что схема подавления помех (СПП) является последней частью уравнения (2), т. е.

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0},$$

где оцененное возмущение $z_3 = \hat{f}$ устраняется путем вычитания его из управляющего сигнала u_0 .

На рис. 3 показан переключатель с двумя различными режимами – 1 и 2 – указывающий на возможность передачи выходного сигнала системы непосредственно в регулятор ОСНОС вместо его расчетного значения \hat{y} .

4. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА α

Вернемся к уравнению динамики системы (1). С учетом входа управляющей системы (выхода системы) $y = z_s - \alpha z_{us}$ ясно, что если замкнутая система устойчива, то значение дрейфа f будет меняться почти линейно с изменением амплитуды дорожных возмущений. Это можно увидеть на рис. 4, где сравнение значений функции f с амплитудой возмущения дороги выполнено для замкнутого контура перемещения подрессоренной массы модели типа «четверть автомобиля», который стабилизируется с помощью УАПП. В то же время прогиб подвески обратно пропорционален значениям функции f .

Желательно, чтобы значения параметра α значительно увеличивались с увеличением прогиба подвески, чтобы сохранить баланс между прогибом подвески и комфортом пассажиров.

Это позволяет применить правило МИТ (MIT rule) с положительным градиентом для получения закона изменения параметра α . В этом случае про-

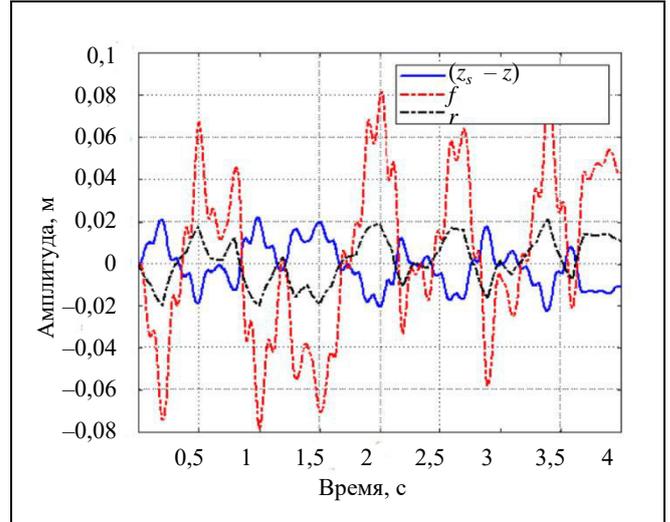


Рис. 4. Значения функции f в зависимости от дорожных помех

гиб подвески можно рассматривать как линейную функцию значений f , т. е.

$$z_s - z_{us} = T_{K,w}(f),$$

где $T_{K,w}$ – фильтр нижних частот (ФНЧ, англ. *Low Pass Filter* (LPF)) с коэффициентом усиления K и частотой среза w . Коэффициент усиления фильтра и частота пропускания являются параметрами настройки. Показатель производительности α будет зависеть от абсолютного значения прогиба подвески, которое можно выбрать следующим образом:

$$J(\alpha) = \frac{1}{2} (z_s(\alpha) - z_{us}(\alpha))^2.$$

Применяя инверсию правила градиента МИТ для увеличения квадратичного показателя производительности по мере увеличения прогиба подвески, получим:

$$\frac{\partial J}{\partial (z_s(\alpha) - z_{us}(\alpha))} = z_s(\alpha) - z_{us}(\alpha) = T_{K,w}(f),$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \gamma \frac{\partial J}{\partial \alpha} = \gamma \frac{\partial J}{\partial (z_s(\alpha) - z_{us}(\alpha))} \times \frac{\partial (z_s(\alpha) - z_{us}(\alpha))}{\partial \alpha} = \gamma T_{K,w}(f) \frac{\dot{T}_{K,w}(f)}{\dot{\alpha}}$$

↓

$$(\dot{\alpha})^2 = \gamma T_{K,w}(f) \dot{T}_{K,w}(f) \Rightarrow \dot{\alpha} = \rho \sqrt{T_{K,w}(f) \dot{T}_{K,w}(f)},$$

где $\gamma > 0$ – параметр настройки и $\rho = \sqrt{\gamma}$. Чтобы упростить задачу, можно считать $\dot{T}_{K,w}(f) =$

Линейный фильтр Калмана построен здесь на основе уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= m_1, \\ \dot{x}_3 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= m_2, \end{aligned} \quad y_e = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_3 \\ x_1 - x_3 \end{pmatrix}, \quad y_m = \begin{pmatrix} \iint m_1 \\ \iint m_2 \\ m_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ m_1 \\ 0 \\ m_2 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где A – матрица состояния; B – матрица управления; C – матрица выхода; m_1 – измеряемое ускорение поддрессоренной массы; m_2 – измеряемое ускорение неподрессоренной массы; m_3 – измеряемый прогиб подвески; y_e – вектор оценки; y_m – вектор измерения и $(x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T = (z_s \ \dot{z}_s \ z_{us} \ \dot{z}_{us})^T$.

Формулы (3), (4) показывают представление в пространстве состояний двух интеграторов второго порядка, которые используются для получения значений положений z_s и z_{us} из измеренных ускорений \ddot{z}_s и \ddot{z}_{us} . Измерение прогиба подвески $z_s - z_{us}$ используется для корректировки расчетных положений в каждый момент времени и для этой цели добавляется в вектор измерения y_m . Без включения измерения прогиба подвески в вектор измерения положения z_s и z_{us} будут иметь постоянные отклонения прогиба от реальных значений.

Матрицы ковариации – ковариация шума процесса и ковариация шума наблюдения – могут быть выбраны эмпирически, начальное значение ковариации оценки изначально выбирается большим, а начальная оценка состояния равна нулю.

Из рис. 5 видно, что значения параметра \dot{a} передаются на детектор огибающей и ограничиваются диапазоном $[0, 1]$. На этом рисунке v_0 – желаемый вход, и в этом подходе он равен нулю. Таким образом, на этом рисунке использование СД не имеет значения, но он присутствует в целях сохранения общей формы УАПП.

Чтобы продемонстрировать эффективность этого закона адаптивного управления, производительность системы оценивается в двух случаях. В первом случае дорожные помехи являются случайными, как в стандарте ISO-8608, в соответствии в ко-

торым система решает проблему комфорта пассажиров. Во втором случае внезапный удар рассматривается как помеха на дороге, при возникновении которой, как ожидается, водитель сосредоточится на задаче управляемости, поскольку основная проблема в этом случае заключается в том, чтобы не потерять контроль над автомобилем.

Чтобы сделать моделирование более реалистичным, мы запустим его на гидравлической активной системе типа «четверть автомобиля» с учетом нелинейной модели гидравлического привода.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В этом разделе приведено описание гидравлической активной системы типа «четверть автомобиля», описание дорожных помех, используемых для моделирования, и результаты применения адаптивного регулятора.

5.1. Гидравлическая активная система типа «четверть автомобиля»

Система активной подвески использует гидравлический привод для уменьшения внешней мощности, необходимой для достижения желаемой производительности, и способна оказывать независимое воздействие на подвеску для улучшения качества передвижения. На рис. 6 показана система активной подвески автомобиля.

Предполагается, что гидравлический привод состоит из золотникового клапана (сервоклапана) и гидроцилиндра. На рис. 6 P_s и P_r обозначены давление гидравлической жидкости, поступающей и выходящей из золотникового клапана соответственно; x_{sp} – положение золотникового клапана;

P_u, P_l – давление масла в верхней и нижней камерах цилиндра. Когда золотниковый клапан перемещается вверх (положительное значение), верхняя камера цилиндра соединяется с подающей линией, и ее давление увеличивается. Тем временем нижняя камера подключается к обратному клапану, и ее давление уменьшается. Этот перепад давления расширяет гидравлический цилиндр.

Для создания механического перемещения золотника клапана электрический ток подается на катушку, которая соединена с сервоклапаном. Привод, на который было подано питание, приведет золотник в нужное положение.

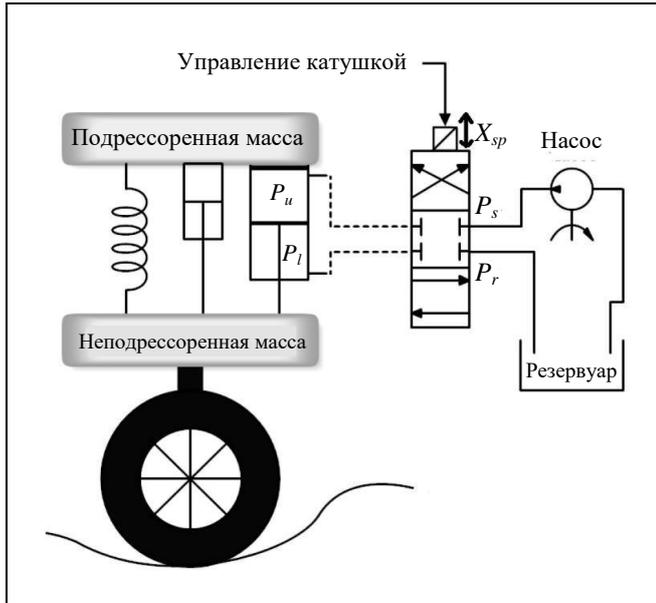


Рис. 6. Активная гидравлическая система подвески

Уравнение привода имеет вид:

$$v_c = L_c \frac{di_{sv}}{dt} + R_c i_{sv} \Rightarrow \frac{I_{sv}}{V_c} = \frac{1}{L_c s + R_c},$$

где R_c и L_c – сопротивление и индуктивность катушки соответственно, v_c – напряжение ротора двигателя, а i_{sv} – его ток. Переход от начертания символов строчными и прописными буквами заключается в представлении уравнений в пространстве Лапласа.

Предполагается, что смещение золотникового клапана x_{sp} связано с током сервоклапана i_{sp} через линейную передаточную функцию

$$\frac{X_{sp}}{I_{sv}} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}, \quad (5)$$

где ξ – коэффициент демпфирования и w_n – собственная частота сервоклапана. Обычно предполагается, что динамика (5) очень быстрая, поэтому мы можем записать

$$\frac{X_{sp}}{V_c} \approx \frac{K_v}{\tau s + 1},$$

где τ – постоянная времени сервоклапана и K_v – постоянная усиления.

Предположим, что:

- площадь открытия клапана линейно связана со смещением золотника;
- площадь поршня намного больше, чем отверстие;

- жидкость несжимаема;
- инерция поршня незначительна;
- изменения давления в двух камерах примерно равны, т. е.

$$\Delta P_u \approx -\Delta P_l = \Delta P.$$

Тогда воздействие определяется как

$$F_a = A_p \Delta P,$$

где A_p – средняя площадь поршня; ΔP – разница давлений в трубопроводах клапанов, которая может быть рассчитана, как в работе [20]:

$$\frac{V_t}{4\beta_e} \Delta \dot{P} = Q - C_{tp} \Delta P - A_p (\dot{z}_s - \dot{z}_{us}),$$

где V_t – общий объем цилиндра; β_e – эффективный объемный модуль; Q – поток гидравлической нагрузки; C_{tp} – общая скорость утечки поршня (*total piston leakage rate*). Уравнение потока с регулировкой нагрузки сервоклапана определяется так:

$$Q = \text{sign}[P_s - \text{sign}(x_{sp})\Delta P] C_d w_g \times x_{sp} \sqrt{\frac{1}{\rho_1} (P_s - \text{sign}(x_{sp})\Delta P)}, \quad (6)$$

где C_d – коэффициент расхода (*discharge coefficient*); w_g – градиент площади золотникового клапана; ρ_1 – плотность гидравлической жидкости. По определению переменных

$$\alpha_1 = 4\beta_e/V_t, \quad \beta = \alpha_1 C_{tp}, \quad \gamma = \alpha_1 C_d w_g \sqrt{1/\rho_1}$$

вся динамика системы может быть представлена в пространстве состояний, как в уравнении (6):

$$\begin{aligned} X_1 &= z_s, \quad X_2 = \dot{z}_s, \quad X_3 = z_{us}, \quad X_4 = \dot{z}_{us}, \\ X_5 &= \Delta P, \quad X_6 = x_{sp}, \quad \dot{X}_1 = X_2, \\ \dot{X}_2 &= -\frac{1}{M_s} (K_s(X_1 - X_3) + C_s(X_2 - X_4) - A_p X_5), \\ \dot{X}_3 &= X_4, \\ \dot{X}_4 &= \frac{1}{M_{us}} (K_s(X_1 - X_3) + C_s(X_2 - X_4) - \\ &\quad - K_{us}(X_3 - z_r) - C_{us}(X_4 - \dot{z}_r) - A_p X_5), \\ \dot{X}_5 &= -\beta X_5 - \alpha_1 A_p (X_2 - X_4 + \gamma X_6 v), \\ \dot{X}_6 &= \frac{1}{\tau} (-X_6 + K_v u), \quad u = V_c, \\ v &= \text{sign}[P_s - \text{sign}(X_6)X_5] \sqrt{P_s - \text{sign}(X_6)X_5}. \end{aligned}$$

В ходе моделирования использовались следующие параметры нелинейной модели системы электрогидравлического привода:

$$\alpha = 4,515 \times 10^{13} \text{ Н/м}^5, \beta = 1 \text{ с}^{-1}, \\ \gamma = 1,545 \times 10^9 \text{ Н/м}^{5/2} \text{ кг}^{1/2}, \\ \tau = \frac{1}{30} \text{ с}, K_v = 4 \times 10^{-3}, A_p = 3,35 \times 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Давление источника $P_s = 10$ бар, внешнее давление $P_r = 1$ бар.

5.2. Модели дорожных возмущений

Для проверки уровня комфорта в качестве дорожных помех используется случайное отфильтрованное возмущение во временной области в соответствии со стандартом ISO-8608 [9]. Дифференциальное уравнение представлено в виде

$$\dot{q}(t) = -2\pi f_0 q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} v w_d(t),$$

где $q(t)$ – случайный входной сигнал; f_0 – фильтр с более низкой частотой среза; $G_q(n_0)$ – коэффициент неровности дороги; $w_d(t)$ – гауссов белый шум. Скорость транспортного средства составляет $v = 54$ Км/ч и он движется по дороге класса С, для которой $G_q(n_0) = 512 \times 10^{-6}$, $n_0 = 0,1$.

Для испытания на управляемость дорожный удар описывается выражением

$$w_d(t) = \begin{cases} 0,5h(1 - \cos(w_b t)), & t_1 \leq t \leq t_2, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $h = 0,1$ м и w_b – высота и частота ударов соответственно; t_1 и t_2 – нижний и верхний временные пределы функции. Частота ударов задается формулой $w_b = 2\pi/(t_2 - t_1)$.

5.3. Результаты моделирования

Результаты моделирования разделены на три части: первая посвящена проблеме комфорта, когда дорожные помехи являются случайным сигналом, вторая посвящена проблеме управляемости, когда дорожные помехи представляют собой несколько последовательных ударов с определенной частотой, а третья изучает две проблемы вместе, когда дорожные помехи указанных типов смешаны.

Поскольку значения $\dot{\alpha}$ всегда положительны, достаточно добавить фильтр нижних частот Бат-

терворта, чтобы получить огибающую сигнала. Константа настройки параметра ρ установлена равной 200. Фильтр нижних частот выбирается так: $T_{K,w} = 0,1/(0,1s + 1)$. Параметры УАПП выбираются равными

$$w = 0,5 \text{ рад/с}, \alpha_1 = 30w, \alpha_2 = 15w^2,$$

$$\alpha_3 = 85w^3, b_0 = 0,15, K_p = w^2, K_d = 2w.$$

На рис. 7 показана реакция замкнутого контура, когда дефект дорожного покрытия является случайным. Видно, что значения параметра α в течение всего процесса сохраняются небольшими, так как смещение между поддресоренной и неподдресоренной массами все еще далеко от его границ. Однако проектировщик может добавить дополнительное условие, установив значение α равным нулю, если оно ниже определенного порога, чтобы система управления сконцентрировалась на проблеме комфорта.

На рис. 8 показана реакция замкнутого контура, когда дефект дорожного покрытия представляет собой последовательность внезапных ударов.

Из рис. 8 видно, что параметр α сохраняет нулевые значения при отсутствии внешних возмущений, но его значение начинает расти при увеличении амплитуды возмущения. Также можно видеть, что значение параметра α начинает медленно снижаться после завершения ударного воздействия. Это соответствует тому, как автомобиль реагирует на возмущения в реальности, так как ему необходимо сохранять контакт колес с дорогой в течение короткого времени после завершения ударного воздействия, для обеспечения большей безопасности.

Чтобы проверить адаптивность предлагаемого блока управления, этот метод управления применяется к системе гидравлической подвески. Предполагается, что автомобиль движется по дороге, типа С, указанного в стандарте ISO-8608, со скоростью 54 км/ч и внезапно перед ним появляется ряд препятствий высотой 0,1 м.

На рис. 9 показана реакция замкнутого контура на указанные дорожные помехи. Видно, что система фокусируется на проблеме комфорта на первом этапе, когда амплитуда возмущений относительно невелика, в то время как она переключается на проблему управляемости при наезде на неровности. После исчезновения высокоамплитудных помех, вызванных ударами, система возвращается к отработке проблемы комфорта.

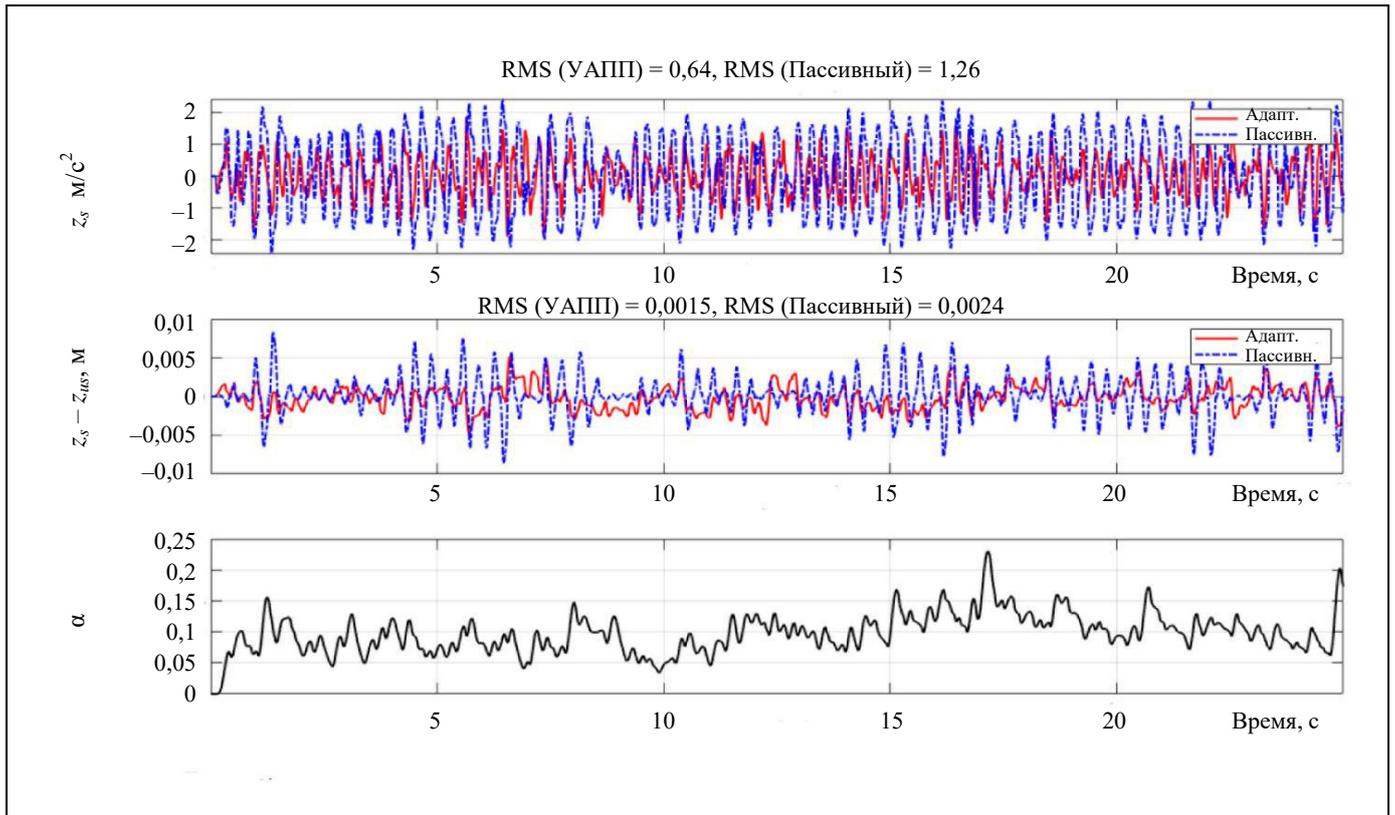


Рис. 7. Результаты работы адаптивной системы при наличии случайных дорожных помех. Синие линии соответствуют пассивной системе, а красные – адаптивному алгоритму УАПП.

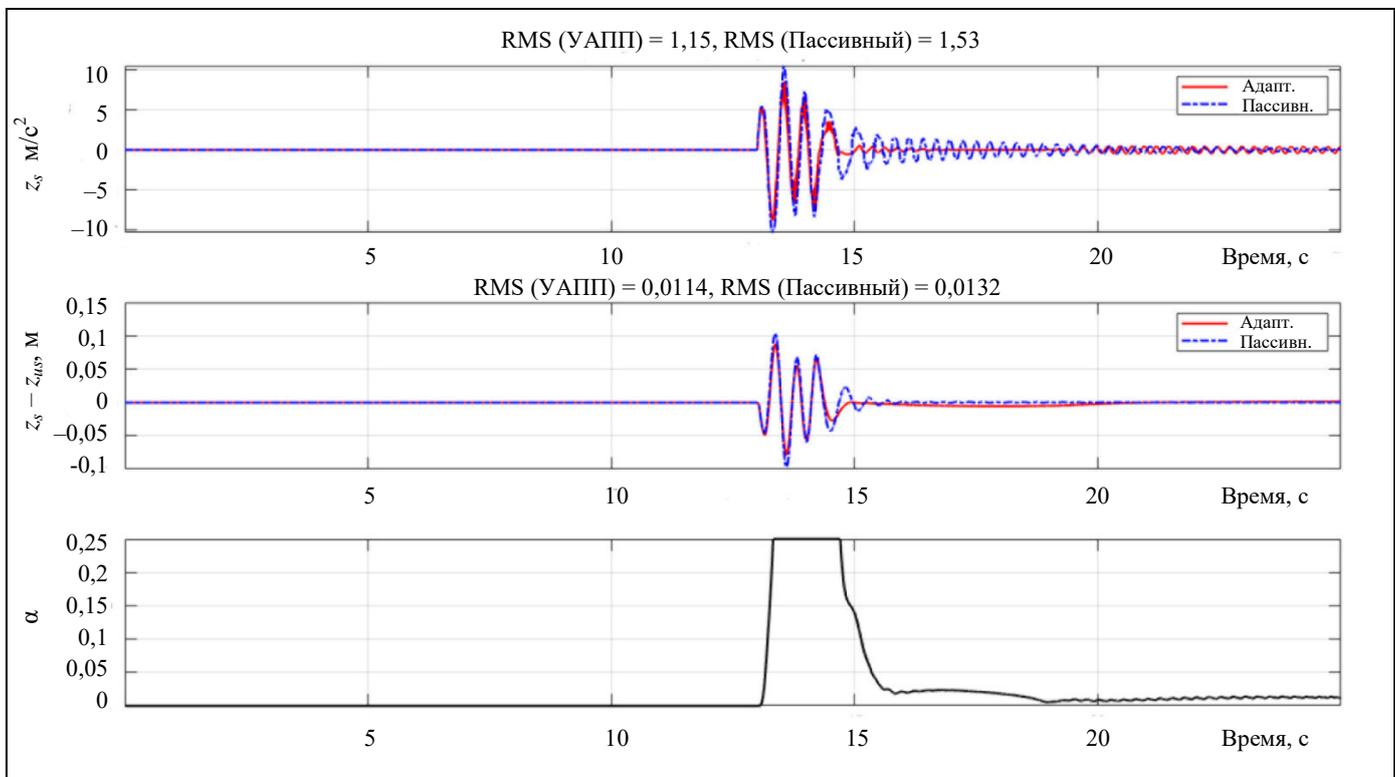


Рис. 8. Результаты работы адаптивной системы при внезапном наезде на дорожные неровности. Синие линии соответствуют пассивной системе, а красные – адаптивному алгоритму УАПП.

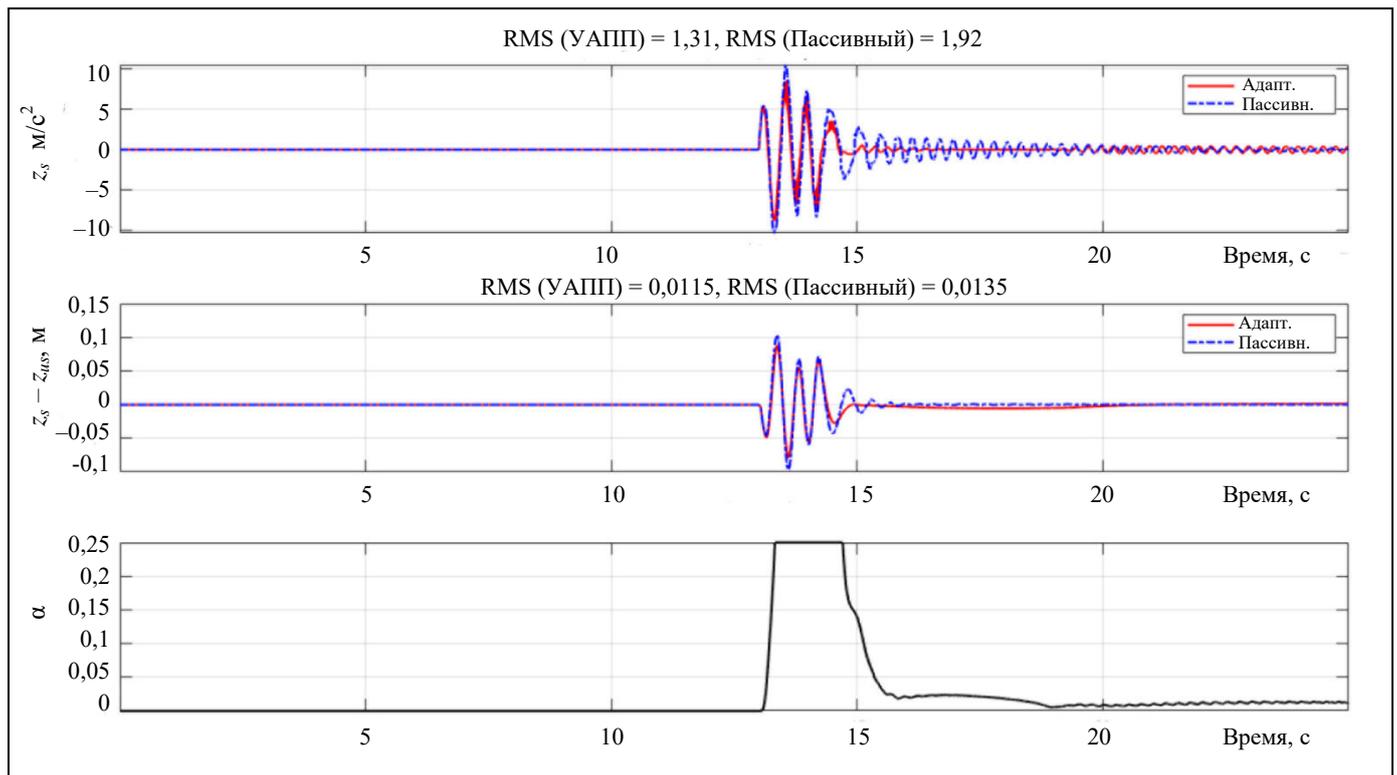


Рис. 9. Реакция замкнутого контура нелинейной системы типа «четверть автомобиля» на гибридные дорожные помехи. Первая строка представляет ускорение поддрессоренной массы, вторая строка представляет прогиб подвески, а третья представляет изменения значения параметра α .

В заключение отметим, что предлагаемый закон управления демонстрирует высокую гибкость в отношении помех, которым подвергается автомобиль. Это позволяет обеспечить компромисс между комфортом и управляемостью с использованием очень простого в настройке и не требующего точного знания динамики системы алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей статье представлен простой подход к управлению противоречием между вертикальным ускорением шасси автомобиля и его положением относительно дорожного покрытия. В связи с возрастающей актуальностью автоматического вождения предлагается механизм автонастройки с применением метода УАПП. Основная идея состоит в том, чтобы использовать отфильтрованные значения общих возмущений, оцененные с помощью УАПП, для переключения режима работы системы между обеспечением комфорта или управляемости. Это делается посредством ввода отфильтрованного значения оцененных возмущений в контур управления путем умножения его на смещение неподрессоренной массы и вычитания его из смещения поддрессоренной массы. Тестирование замкнутой системы проводится в предполо-

жении, что автомобиль движется по дороге низкого качества на средней скорости и внезапно перед ним появляется ряд препятствий относительно большой высоты.

Результаты моделирования показали способность алгоритма адаптироваться и автоматически переключать внимание между проблемами комфорта и управляемости. Более того, результаты показывают, что этот алгоритм может быть легко настроен для применения к нелинейной модели.

В качестве перспективных направлений исследований можно отметить изучение влияния настройки параметров фильтра Калмана и изменения модели дорожных помех на производительность системы. Кроме того, влияние использования этого регулятора на всю систему автомобиля можно изучить при маневрировании, поворотах и следовании по траектории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goodarzi, A., and Khajepour, A. Vehicle Suspension System technology and design. – Kentfield, CA: 2017. – 77 p.
2. Pinkaew, T., and Fujino, Y. Effectiveness of Semi-active Tuned Mass Dampers under Harmonic Excitation // Engineering Structures. – 2001. – Vol. 23, no.7. – P. 850–856.
3. Chaves, M., Maia, J., and Esteves, J. Analysis of an Electromagnetic Automobile Suspension System. – 2008.



- International Conference on Electrical Machines. – Vilamoura, Portugal, 2008.
4. *Mihai, I., and Andronic, F.* Behavior of a Semi-active Suspension System versus a Passive Suspension System on an Uneven Road Surface // *Mechanics*. – 2014. – Vol 20, no.1. – P. 64–69.
 5. *Zhileykin, M.M., Kotiev, G.O., and Nagatsev, M.V.* Synthesis of the Adaptive Continuous System for the Multi-axle Wheeled Vehicle Body Oscillation Damping // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 315, no. 1.
 6. *Ovsyannikov, S., Kalinin, E., and Kolesnik, I.* Oscillation Process of Multi-support Machines When Driving over Irregularities // *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. – Springer, Cham, 2018.
 7. *Yao, G.Z., Yap, F.F. Chen, G., et al.* MR Damper and Its Application for Semi-active Control of Vehicle Suspension System // *Mechatronics*. – 2002. – Vol. 12, no.7. – P. 963–973.
 8. *Lajqi, S., and Pehan, S.* Designs and Optimizations of Active and Semi-active Non-linear Suspension Systems for a Terrain Vehicle // *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. 58, no.12. – P. 732–743.
 9. *Zhou, Q.* Research and Simulation on New Active Suspension Control System. – A thesis presented to the Graduate and Research Committee of Lehigh University in Candidacy for the Degree of Master of Science. – Lehigh University, 2013.
 10. *Maizza, G., and Franz, D.* Simulink Control Model Of An Active Pneumatic Suspension System In Passenger Cars. – Politecnico di Torino, 2019. – 65 p.
 11. *Ryu, S., Park, Y., and Suh, M.* Ride Quality Analysis of a Tracked Vehicle Suspension with a Preview Control // *Journal of Terramechanics*. – 2011. – Vol. 48, no.6. – P. 409–417.
 12. *Tan, B, Wu, Y., Zhang, N., et al.* Improvement of Ride Quality for Patient Lying in Ambulance with a New Hydro-Pneumatic Suspension // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 11, no. 4. – P. 1–20.
 13. *Abe, M.* Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.
 14. *Savsani, Vimal, Patel, V.K., Gadhvi, B, and Tawhid, M.* Pareto Optimization of a Half Car Passive Suspension Model Using a Novel Multiobjective Heat Transfer Search Algorithm // *Modelling and Simulation in Engineering*. – 2017. – Vol. 2017. – Art. ID 2034907.
 15. *Els, P.S., Theron, N., Uys, P.E., Thoesson, M.* The Ride Comfort vs. Handling Compromise for Off-road Vehicles // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – Vol. 44, no. 4. – P. 303–317.
 16. *Singh, N., Chhabra, H., and Bhangal, K.* Robust Control of Vehicle Active Suspension System // *International Journal of Control and Automation*. – 2016. – Vol. 9, no. 4. – P. 149–160.
 17. *Hasbullah, F., Faris, W., Darsivan, J., Abdelrahman, M.* Ride Comfort Performance of a Vehicle Using Active Suspension System with Active Disturbance Rejection Control // *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. – 2015. – Vol. 11, no. 1. – P. 78–101.
 18. *de Jesús Lozoya-Santos, J., Tudón-Martínez, J., Morales-Menéndez, R., and Ramírez-Mendoza, R.* Comparison of on-off Control Strategies for a Semi-active Automotive Suspension Using HiL // *IEEE Latin America Transactions*. – 2012. – Vol. 10, no. 5. – P. 2045–2052.
 19. *Han, J.* From PID to Active Disturbance Rejection Control // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2009. – Vol. 56, no. 3. – P. 900–906.
 20. *Pedro, J.O., Dangor, O., Dahunsi, O.A, Ali, M.* CRS and PS-Optimised PID Controller for Nonlinear, electrohydraulic Suspension Systems. – 2013 9th Asian Control Conference (ASCC). – Istanbul, 2013.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А Красновой.

*Поступила в редакцию 15.10.2021,
после доработки 15.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.*

Алхелу Мухаммед – аспирант, ✉ alkhelum@student.bmstu.ru,

Вассуф Язан – аспирант, ✉ thelegend990@gmail.com,

Серебранный Владимир Валерьевич – канд. техн. наук,
✉ vsereb@bmstu.ru,

Гаврилов Александр Игоревич – канд. техн. наук,
✉ alexgavrilov@mail.ru.

Лобусов Евгений Сергеевич – канд. техн. наук,
✉ evgeny.lobusov@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

THE HANDLING-COMFORT TRADE-OFF IN A QUARTER-CAR SYSTEM: AUTOMATIC ADAPTIVE MANAGEMENT VIA ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL

M. Alhelou¹, Y. Wassouf², V.V. Serebrenny³, A.I. Gavrilov⁴, and E.S. Lobusov⁵

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹✉ alkhelum@student.bmstu.ru ²✉ thelegend990@gmail.com ³✉ vsereb@bmstu.ru ⁴✉ alexgavrilov@mail.ru ⁵✉ evgeny.lobusov@yandex.ru

Abstract. The effectiveness of a vehicle suspension is often assessed by maximum passenger comfort given continuous contact with the road (road holding). This paper investigates managing the comfort-handling trade-off in a quarter-car suspension system via active disturbance rejection control (ADRC). An adaptive control law is built to manage this trade-off automatically depending on the ADRC parameters. The idea is to use the ADRC-estimated disturbance signal to adjust the system's domain of interest. The effectiveness of the proposed approach is validated: the adaptive control law is tested for a nonlinear hydraulic suspension system. Moreover, the effects of road disturbances amplitudes and road quality on the system performance are studied. Simulation results show the smoothness and simplicity of the adaptive algorithm for managing the comfort-handling trade-off.

Keywords: active disturbance rejection control (ADRC), quarter-car model (QCM), tracking differentiator (TD), nonlinear state error feedback (NLSEF), extended state observer (ESO), disturbance rejection scheme (DRS), proportional-integral-differential (PID) controller, proportional-differential (PD) controller, road handling, ride comfort, road holding, gradient MIT rule (adaptive control method).