

# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## Главный редактор

Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ  
**Басараб М.А.** — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Большаков А.А.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Булдакова Т.И.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Ван Мэйлин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Зинченко Л.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Зубов Н.Е.** — д.т.н., проф., РКК «Энергия»  
**Кларк Р.** — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,  
Великобритания)  
**Криони Н.К.** — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)  
**Кузнецов А.Е.** — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)  
**Мальцева С.В.** — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ  
**Микаева С.А.** — д.т.н., проф., МИРЭА — РТУ  
**Неусыпин К.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Нефёдов Е.И.** — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН  
**Никифоров В.М.** — д.т.н., проф., ФГУП «НППАП  
им. Н.А. Пилюгина»  
**Пролетарский А.В.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Проталинский О.М.** — д.т.н., проф., НИУ МЭИ  
**Путилов В.Н.** — ООО «Изд-во "Инновационное  
машиностроение"» (заместитель  
главного редактора)  
**Румянцева О.Н.** — генеральный директор ООО «Изд-во  
"Инновационное машиностроение"»  
**Ся Юаньцин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Фу Ли** — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)  
**Фёдоров И.Б.** — д.т.н., проф., академик РАН,  
президент МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Хэ Юн** — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т  
науки и технологий (КНР)  
**Чистякова Т.Б.** — д.т.н., проф., СПбГТИ (ТУ)  
**Шибанов Г.П.** — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.  
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**  
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

## Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.  
Тел.: 8 (499) 268-41-77.  
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;  
http://www.mashin.ru

## Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.  
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК  
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов  
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-  
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 75

4  
2021

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Шалумов А.С., Малов А.В., Шалумов М.А.** АСОНИКА-В:  
моделирование конструкций электроники, установленных  
на виброизоляторах, на механические воздействия . . . . . 147

**Арапов Д.В., Курицын В.А.** Оптимизация режима реак-  
торного блока пиролизных печей SRT-I для производства  
этилена . . . . . 153

**Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А.** Оценка ме-  
ханической надёжности клиноремённой передачи двигателя  
станка-качалки для добычи нефти . . . . . 160

**Горбунов А.А., Калабкин А.А., Микаева С.А.** Светодиод-  
ный светильник для низковольтных сетей . . . . . 163

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

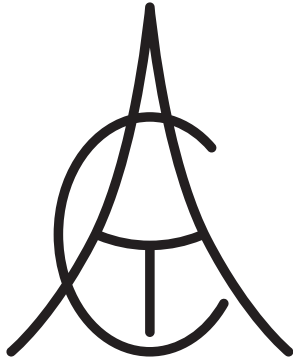
**Пупков К.А., Броварская Ю.К.** Динамические и информа-  
ционные свойства интеллектуальных систем управления . . 167

**Зинченко Л.А., Казаков В.В., Мионов А.А.** Иерархиче-  
ский дескриптор для отображения информации о много-  
слойных радиационно стойких экранах защиты электронной  
аппаратуры . . . . . 171

**Рязанова Н.Ю., Осипова С.В., Михайлова Т.Ю.** Метод по-  
строения классификатора сетевого трафика на основе глу-  
бокого обучения. . . . . 177

**Ху Цяоцу.** Исследование процедуры параметрической иден-  
тификации погрешностей инерциальной навигационной си-  
стемы беспилотного летательного аппарата . . . . . 183

**Подчерзев В.П., Топильская С.В.** Выбор конфигурации и  
параметров системы виброзащиты гироскопических измери-  
телей угловой скорости . . . . . 187



# Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## Chief in Editor

**Shakhnov V.A.** – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,  
MSTU behalf of N.E. Bauman

## EDITORIAL COUNCIL:

- Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE  
**Basarab M.A.** – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman  
**Bolshakov A.A.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)  
**Buldakova T.I.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman  
**Wang Meiling** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China  
**Zinchenko L.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman  
**Zubov N.E.** – dr.en.s., prof., RSC «Energy»  
**Clark R.** – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK  
**Krioni N.K.** – dr.en.s., prof., USATU, Ufa  
**Kuznetsov A.E.** – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan  
**Maltseva S.V.** – dr.en.s., prof., NRU HSE  
**Mikaeva S.A.** – dr.en.s., prof., MIREA—RTU  
**Neusypin K.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman  
**Nefedov E.I.** – dr.ph.-m.s., IRE RAS  
**Nikiforov V.M.** – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP  
behalf of N.A. Pilyugin»  
**Proletarskiy A.V.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman  
**Protalinsky O.M.** – dr.en.s., prof., NRU MPEI  
**Putilov V.N.** – LLC «Innovative Mashinostroenie»  
Publishers» (deputy chief editor)  
**Rumyantseva O.N.** – General Director of LLC «Innovative  
Mashinostroenie» Publishers»  
**Xia Yuantsin** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China  
**Fu Li** – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China  
**Fedorov I.B.** – dr.en.s., prof., academician of RAS, President  
of MSTU behalf of N.E. Bauman  
**He Yung** – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science  
and Technology, P.R. China  
**Chistyakova T.B.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)  
**Shibanov G.P.** – dr.en.s., prof., State Flight Test Center  
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**  
Computer layout — **Konova E.V.**

## Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2  
Tel.: +7 (499) 268-41-77.  
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;  
http://www.mashin.ru

## Founder:

LLC «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 75  $\frac{4}{2021}$

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

- Shalumov A.S., Malov A.V., Shalumov M.A.** ASONIKA-V:  
mechanical influence simulation of electronic structures installed  
on vibration isolators . . . . . 147
- Arapov D.V., Kuritsyn V.A.** The mode optimization of the SRT-I  
pyrolysis furnaces reactor block for ethylene production . . . . . 153
- Yangirov I.F., Khalikov A.R., Safiullin R.A.** The mechanical  
reliability evaluation of the V-belt drive of the conventional pum-  
ping unit for oil extraction . . . . . 160
- Gorbulov A.A., Kalabkin A.A., Mikaeva S.A.** LED lamp for low  
voltage networks . . . . . 163

### MODERN TECHNOLOGIES

- Pupkov K.A., Brovarskaya Yu.K.** Dynamic and informational  
properties of intelligent control systems . . . . . 167
- Zinchenko L.A., Kazakov V.V., Mironov A.A.** Hierarchical de-  
scriptor for displaying information about multilayer radiation-  
resistant shields for electronic equipment protection . . . . . 171
- Ryazanova N.Yu., Osipova S.V., Mikhaylova T.Yu.** A method for  
constructing a network traffic classifier based on deep learning . . . 177
- Khu Tsyatsyu.** Investigation of the parametric identification pro-  
cedure of the inertial navigation system errors for an unmanned  
aerial vehicle . . . . . 183
- Podchezertsev V.P., Topilskaya S.V.** Choice of configuration and  
parameters of the vibration protection system for gyroscopic angu-  
lar velocity meters . . . . . 187



А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф., А.В. Малов, канд. техн. наук,  
М.А. Шалумов, канд. техн. наук  
(ООО «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)  
als@asonika-online.ru

## АСОНИКА-В: МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ВИБРОИЗОЛЯТОРАХ, НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Рассмотрен программный комплекс АСОНИКА-В, предназначенный для анализа механических характеристик конструкций шкафов, стоек и блоков радиоэлектронных средств, установленных на виброизоляторах. Предусмотрен учёт гармонической вибрации, случайной вибрации, ударных нагрузок, линейного ускорения, акустических шумов. Рассмотрены вопросы идентификации, параметрической и структурной оптимизации.*

**Ключевые слова:** радиотехническое устройство; механические характеристики; идентификация; математическое моделирование; виброизолятор; оптимизация.

*The ASONIKA-V software package, intended for the mechanical characteristics analysis of the cabinets, racks and blocks of radio-electronic equipment installed on vibration isolators is considered. Account of harmonic vibration, random vibration, shock loads, linear acceleration, acoustic noise is provided. The issues of identification, parametric and structural optimization are considered.*

**Keywords:** radio engineering device; mechanical characteristics; identification; math modeling; vibration isolator; optimization.

Программный комплекс АСОНИКА-В предназначен для анализа механических характеристик конструкций шкафов, стоек и блоков радиоэлектронных средств (РЭС), установленных на виброизоляторах, при воздействии гармонической вибрации, случайной вибрации, ударных нагрузок, линейного ускорения, акустических шумов и для принятия решения на основе полученных механических характеристик в целях обеспечения стойкости РЭС при механических воздействиях [1–3].

Моделирование на ЭВМ механических процессов в конструкциях РЭС, установленных на виброизоляторах, необходимо для:

проверки выполнения требований по стойкости к конструкциям РЭС, установленных на виброизоляторах, при заданных механических воздействиях;

определения возможности снижения массы и габаритов конструкции РЭС, установленных на виброизоляторах;

повышения стойкости конструкций РЭС при механических воздействиях путём выбора параметров виброизоляторов;

создания программы лабораторных и приёмосдаточных испытаний РЭС, установленных на виброизоляторах, и проверки соответствия РЭС планируемому испытанию.

Программный комплекс АСОНИКА-В наиболее целесообразно использовать при разработке РЭС, работающих при воздействии вибраций и акустических шумов в широких диапазонах частот.

По результатам расчёта на ЭВМ пользователем автоматизированной системы может быть получена следующая выходная информация:

зависимости амплитуд виброускорений и виброперемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах от частоты гармонического вибрационного воздействия;

резонансные частоты элементов конструкции РЭС на виброизоляторах;

среднеквадратичные значения виброускорений и виброперемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах при воздействии случайной вибрации;

зависимости спектральных плотностей виброускорений и виброперемещений элемен-

тов конструкции РЭС на виброизоляторах от частоты случайной вибрации;

зависимости ударных ускорений и перемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах от времени;

зависимости ускорений и перемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах от времени при воздействии линейного ускорения;

среднеквадратичные значения ускорений и перемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах при воздействии акустического шума;

зависимости спектральных плотностей ускорений и перемещений элементов конструкции РЭС на виброизоляторах от частоты акустического шума.

Графический редактор АСОНИКА-В предназначен для визуального отображения и редактирования узлов разрабатываемой конструкции и позволяет работать со следующими узлами конструкции: «элемент» — прямоугольный параллелепипед со сторонами, параллельными осям координат; «коробка» — набор из шести прилегающих друг к другу элементов; «виброизолятор» — отображается в виде конуса.

Под элементом понимается рассчитываемый объект — стенка блока или шкафа, РЭС в блоке или в шкафу, плата и т. д. Коробка представляет собой готовый набор из шести элементов — стенок блока. Габариты коробки используются при учёте акустического давления, о чём необходимо помнить при проектировании модели.

В АСОНИКА-В предусмотрены следующие действия в графическом редакторе: создание элемента; создание коробки; создание и прикрепление виброизолятора; перемещение узлов конструкции, например виброизолятора.

Существует возможность работы с группами. Для удобства элементы конструкции могут быть объединены в группу.

Возможность работы с базой данных позволяет осуществлять следующие действия: выбор материала элемента из базы данных, добавление виброизолятора в базу данных.

В АСОНИКА-В поддерживаются пять видов внешних воздействий: гармоническое, случайное, удар, линейное ускорение, акустическое. Выбор воздействия осуществляется в окне «Дерево конструкции» в папке «Воздействия».

После выбора воздействия в окне графического ввода появляется интерфейс ввода воздействия. Параметры воздействия можно изменять в редакторе свойств. Кривая воздействия

строится в виде непрерывной ломаной линии. Нажатием правой кнопки мыши добавляются новые точки графика. Выбор текущей точки осуществляется левой кнопкой мыши.

Существует возможность импорта воздействия.

Для просмотра результатов расчёта нужно выбрать вид воздействия в окне «Дерево конструкции» в папке «Результаты». Результат расчётов отображается в виде графика, на котором каждая линия соответствует оси результата. Результаты по различным осям отображаются различными цветами: ось  $X$  — красным, ось  $Y$  — зелёным, ось  $Z$  — синим. Редактор свойств позволяет переключать видимость осей путём изменения соответствующих свойств. Также редактор свойств позволяет выбрать требуемый уровень конструкции и тип выходной характеристики (ускорение или перемещение).

В АСОНИКА-В предусмотрены различные способы сохранения результатов расчётов. Для сохранения результатов расчётов в виде текстового файла следует вначале провести расчёт, затем выбрать пункт меню «Расчёт/Экспорт». В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать папку и имя файла для экспорта, а также указать тип файла.

В АСОНИКА-В поддерживаются два формата экспорта результатов расчётов в виде текстового файла:

- 1) формат с файлами, разделёнными запятыми (\*.csv), — предназначен для просмотра и анализа результатов в программе Microsoft Excel;
- 2) формат Асоника-М (\*.in) — предназначен для передачи в АСОНИКА-М.

Предусмотрена также возможность экспорта графика. Для сохранения графика результатов расчёта в виде графического файла следует вначале провести расчёт, затем выбрать пункт меню «Расчёт/Экспорт графика», после чего откроется диалоговое окно, поля которого позволяют задать необходимый размер изображения графика в пикселях, а также назначение экспорта.

В АСОНИКА-В предусмотрена возможность моделирования многоуровневых конструкций.

После назначения уровней элементам конструкции необходимо провести расчёт. Расчёт происходит одновременно для всех имеющихся в конструкции уровней. Просмотреть выходную характеристику конструкции на требуемом уровне можно, изменяя свойство «Уровень узла результата в редакторе свойств».

В АСОНИКА-В предусмотрена возможность проведения идентификации параметров.

Задача идентификации формулируется в следующем виде: необходимо найти такие значения параметров математической модели, которые удовлетворяют минимуму целевой функции и лежат в области допустимых значений параметров, т. е. задача идентификации сводится к задаче оптимизации.

В АСОНИКА-В предусмотрена также возможность оптимизации параметров конструкции. Возможно провести параметрическую и структурную (по положению или по количеству) оптимизацию.

Параметрическая оптимизация для задач АСОНИКА-В — это подбор параметров виброизоляторов, которые требуются по техническому условию.

Структурная оптимизация предназначена для синтеза новой конструкции в том случае, когда число (оптимизация по количеству) и положение (оптимизация по положению) виброизоляторов заранее не известны и могут варьироваться в широких пределах. Программа может подобрать как число виброизоляторов, так и их структурное положение. В обоих случаях критерием оптимальности является наибольшее соответствие полученной характеристики ограничениям, а не минимум изоляторов.

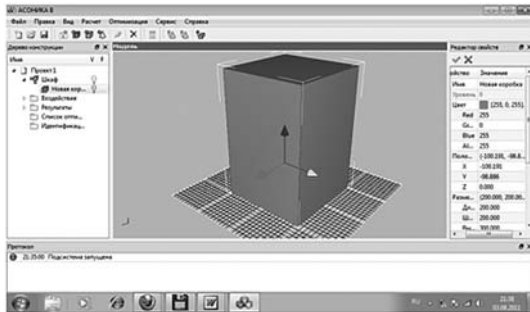


Рис. 1. Выполнение команды меню «Правка/Добавить коробку»



Рис. 2. Ввод материала из базы данных. Диалоговое окно открыто после выполнения команды меню «Правка/База данных/Назначить материал элементу»

**Пример 1.** В качестве примера моделирования рассмотрим следующую задачу. Создать шкаф, включающий в себя три блока. Добавить изоляторы для блока и платы, а также для нижней стенки шкафа. Провести расчёт на гармоническую вибрацию.

Основные этапы моделирования иллюстрируют рис. 1...10.

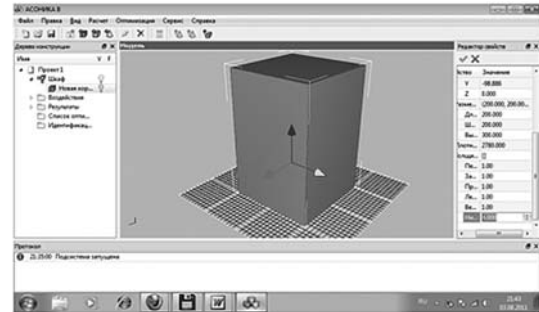


Рис. 3. Корректировка толщины нижней стенки

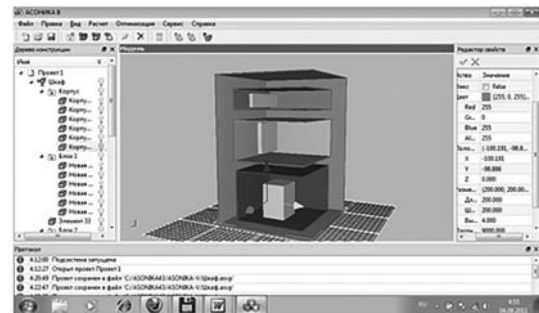


Рис. 4. Введены три блока в виде коробки

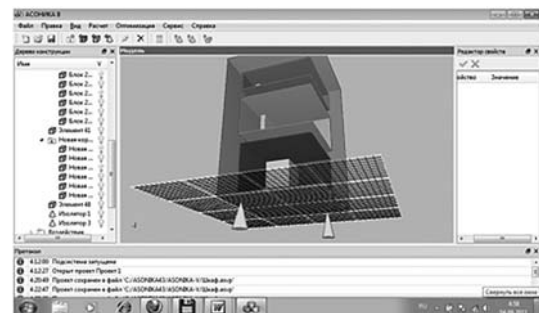


Рис. 5. Добавлены два изолятора для шкафа

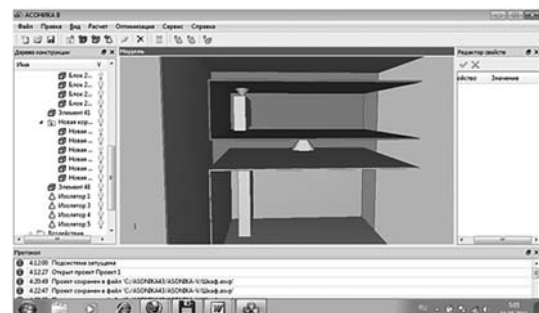


Рис. 6. Добавлены изоляторы для блока и платы

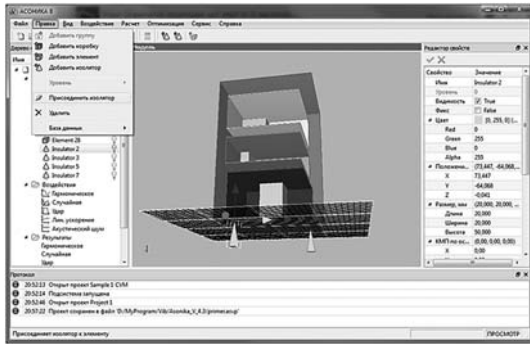


Рис. 7. Привязка изоляторов к нижней стенке шкафа: команда меню «Правка/Присоединить изолятор»

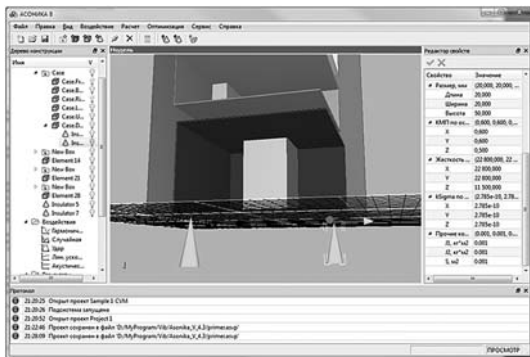


Рис. 8. Ввод параметров изоляторов

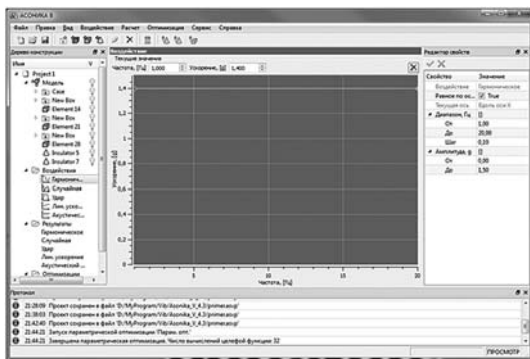


Рис. 9. Ввод параметров гармонической вибрации

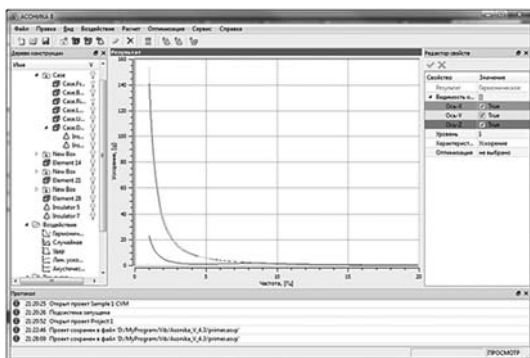


Рис. 10. Расчёт конструкции при воздействии гармонической вибрации (после выполнения команды меню «Расчёт/Рассчитать»)

**Пример 2** иллюстрирует возможности АСОНИКА-В по идентификации параметров. Для проведения идентификации сначала нужно открыть проект с моделью конструкции, установленной на виброизоляторы.

Для идентификации параметров требуется выбрать пункт меню «Оптимизация/Идентификация». При этом в проекте создаётся новый узел идентификации и происходит автоматический переход к нему. Откроется диалоговое окно «Воздействие» для ввода экспериментального графика.

В окне свойств задаются следующие значения: амплитуду изменили на 10g; убран флажок «Равное по осям»; текущая ось Z; введён график по точкам (рис. 11).

В свойстве «Страница» после выбора значения «Параметры» произойдёт переключение на редактор параметров. Флажками отмечаются идентифицируемые параметры по всем осям — жёсткость, КМП, Ksigma. Ставится флажок «Расчёт в диапазоне частот». При идентификации на отрезке необходимо поставить флажок «Расчёт в диапазоне частот» и указать допустимое отклонение в поле «Допустимое отклонение» (рис. 12). В этом случае программа пы-

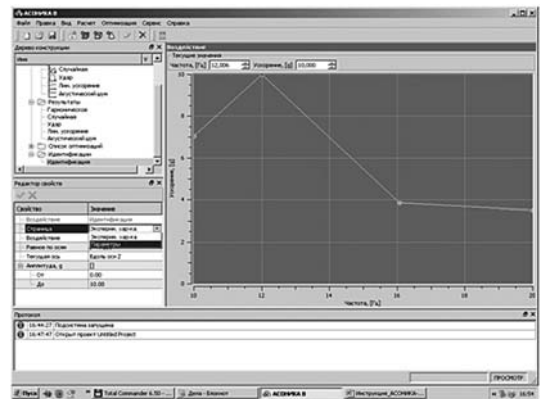


Рис. 11. Экспериментальный график

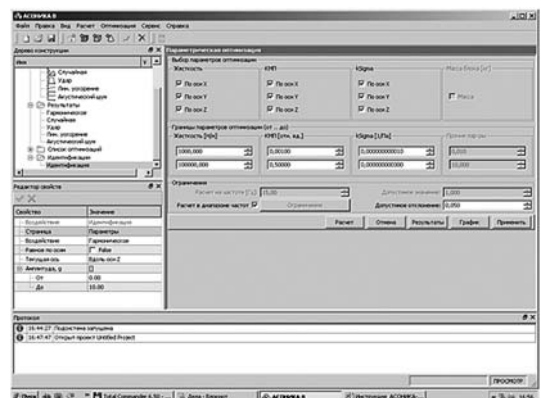


Рис. 12. Ввод параметров для идентификации

тается подобрать параметры виброизоляторов для обеспечения максимального соответствия экспериментальной характеристике.

Для проведения расчёта нажимается кнопка «Расчёт», по завершении расчёта нажимается кнопка «Результаты». Появляется окно с результатами идентификации (рис. 13). При нажатии на кнопку «График» происходит автоматический переход к соответствующему узлу результата. Тонкими линиями показаны начальные графики без проведения идентификации, а толстыми линиями — графики с учётом идентификации заданных параметров (рис. 14).

При идентификации в точке необходимо указать значение частоты в поле «Рас-

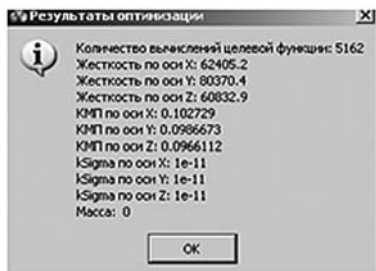


Рис. 13. Окно результатов

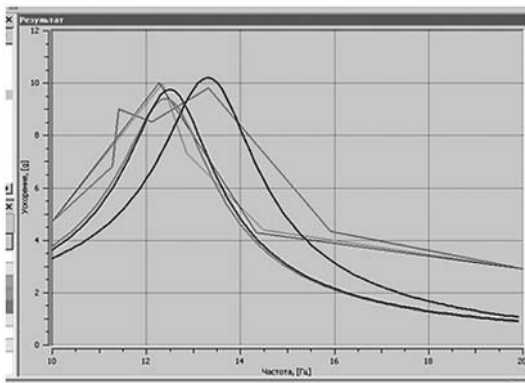


Рис. 14. Графики результатов без проведения идентификации и с её учётом

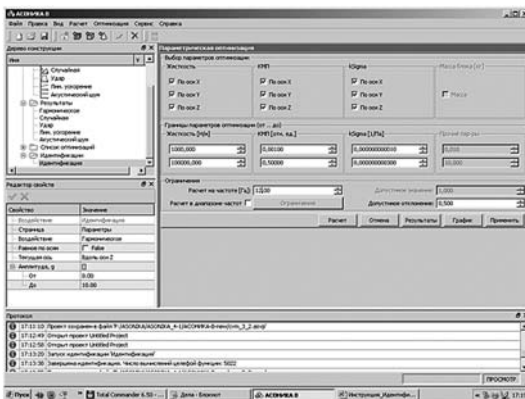


Рис. 15. Параметры идентификации

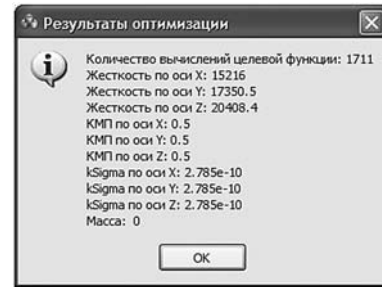


Рис. 16. Результаты идентификации

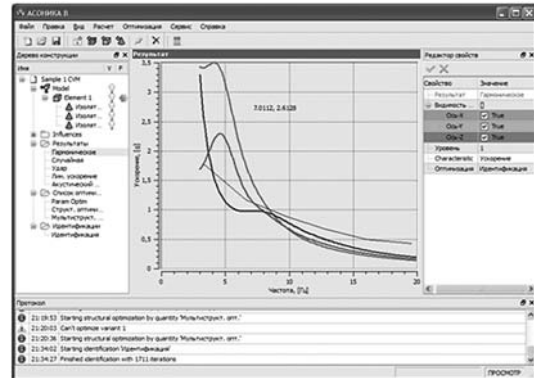


Рис. 17. Графики по результатам идентификации

чёт на частоте». При идентификации в точке АСОНИКА-В пытается подобрать параметры изоляторов для обеспечения максимального соответствия значения ускорения на данной частоте экспериментальной характеристике. Таким образом, значение ускорения при идентификации в точке также берется из экспериментальной характеристики (рис. 15). В примере «Расчёт на частоте» проводится идентификация на частоте 12 Гц. Результаты идентификации представлены на рис. 16, 17.

**Пример 3.** Параметрическая оптимизация в точке.

Для начала работы необходимо открыть проект модели в АСОНИКА-В. Далее нужно выбрать необходимый уровень конструкции в редакторе свойств. Это может быть элемент или коробка, т. е. тот узел, на котором требуется провести параметрическую оптимизацию. В данном примере это Element 1 (рис. 18).

Затем выбирается параметрическая оптимизация: пункт меню «Оптимизация/Параметрическая». Откроется диалоговое окно для ввода параметров. Введённые параметры представлены на рис. 19. Результаты оптимизации представлены на рис. 20, 21. Жирными линиями показаны графики по оптимизированным параметрам виброизоляторов (в данном случае ускорение не должно превышать

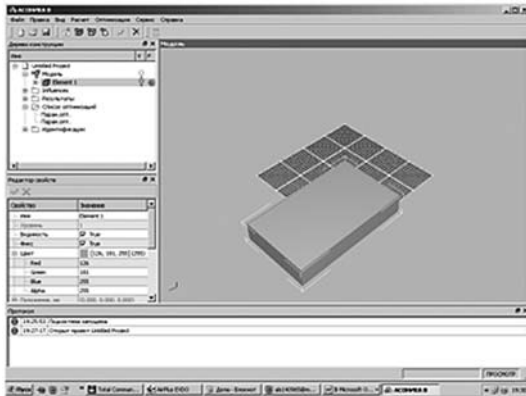


Рис. 18. Выбор необходимого уровня конструкции

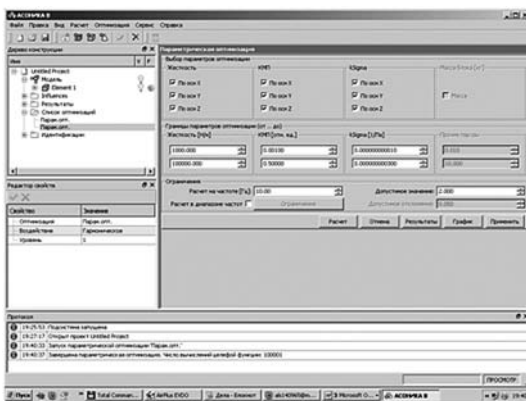


Рис. 19. Параметры оптимизации

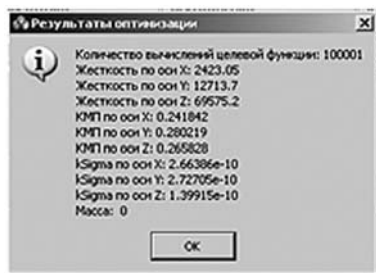


Рис. 20. Результаты оптимизации

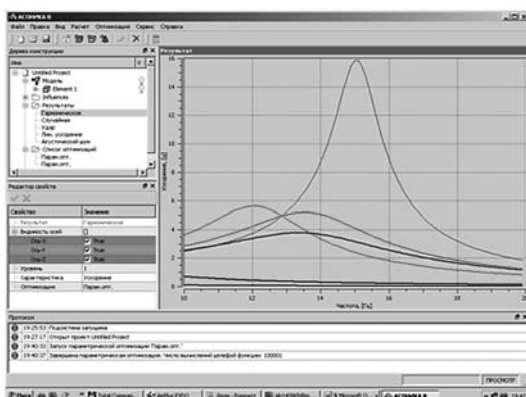


Рис. 21. График по результатам оптимизации

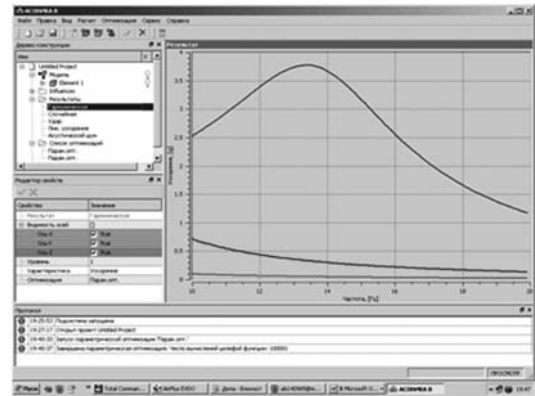


Рис. 22. График результатов расчёта на гармоническую вибрацию с оптимизированными параметрами виброизоляторов

2g на частоте 10 Гц), тонкими линиями — графики для первоначальных параметров виброизоляторов.

Для сохранения оптимизированных параметров виброизоляторов в основном меню нужно нажать кнопки «Расчёт», «Перейти к оптимизации», «Применить». Теперь, если провести расчёт, например, на гармоническую вибрацию, получатся сразу результаты для оптимизированных параметров виброизоляторов (рис. 22).

### Библиографические ссылки

1. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

2. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

3. Шалумов М.А., Шалумов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

### Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Малов А.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-В: моделирование конструкций электроники, установленных на виброизоляторах, на механические воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 147—152. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-4-147-152.



УДК 661.723.612

**Д.В. Арапов**, канд. техн. наук, доц.  
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),  
**В.А. Курицын**, канд. техн. наук  
(ЗАО «Инженерные системы автоматизации», г. Воронеж)  
arapovdv@gmail.com

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РЕАКТОРНОГО БЛОКА ПИРОЛИЗНЫХ ПЕЧЕЙ SRT-I ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

*Разработана математическая модель и предложено решение задачи управления реакторным блоком печей SRT-I в производстве этилена ЭП-300, заключающееся в оптимизации и стабилизации идентичного технологического режима в змеевиках печей путём оптимального распределения сырья, обеспечивающего оптимальную близость их эксплуатационных характеристик и состава пирогаза. Результат оптимизации — увеличение выхода этилена на 1 % и пробега печи на 110 ч.*

**Ключевые слова:** пиролиз бензина; математическая модель; оптимальное распределение сырья.

*A mathematical model is developed and a problem solution over control of the SRT-I furnaces reactor block at the production of EP-300 ethylene is proposed. The solution consists in optimizing and stabilizing an identical technological regime in the furnace coils by means of optimal distribution of raw materials, ensuring the optimal proximity of their operational characteristics and the composition of the pyrolysis gas. Optimization result — increased ethylene yield by 1 % and kiln run for 110 hours.*

**Keywords:** gasoline pyrolysis; mathematical model; optimal distribution of raw materials.

**Введение.** Типовое крупнотоннажное производство этилена и пропилена ЭП-300 представляет собой сложную химико-технологическую систему, основным узлом которой является реакторный блок отделения продуктов пиролиза, включающий в себя восемь параллельно работающих бензиновых печей и две этановые печи типа SRT-I. Одновременно работают семь бензиновых печей и одна этановая. Каждая бензиновая печь состоит из двух камер, содержащих по четыре пиролизных змеевика, попарно подключённых к двум закалочно-испарительным аппаратам (ЗИА). Полученный в печах пиролизный газ (пирогаз) отмывается от сажи, кокса и смолы, отделяется от жидких продуктов, сжимается в пирогазовом компрессоре, далее охлаждением переводится в жидкое состояние и поступает в разделительные колонны, где посредством низкотемпературной ректификации разделяется на отдельные продукты и фракции. Кокс частично откладывается на внутренних стенках труб пирозмеевков и входных трубных решётках ЗИА. Часть тяжёлых жидких продуктов (ТЖП) конденсируется в трубах ЗИА и с течением времени также превращается в кокс. Коэффициент теплоотдачи от пирогаза к хладагенту уменьшается, и эффективность охлаждения пирогаза в ЗИА падает. По

мере закоксовывания труб змеевиков и ЗИА пиролизные печи останавливают на очистку от кокса. Для снижения парциального давления углеводородов и уменьшения образования кокса и ТЖП углеводородное сырьё разбавляется водяным паром.

Управляющими воздействиями, вырабатываемыми в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУТП) пиролиза, являются расходы сырья и пара в  $l$ -й змеевик, температура пирогаза на выходе  $l$ -го змеевика, давление на всасе пирогазового компрессора. Важнейшие измеряемые параметры — давление на входе в  $l$ -й пирозмеевик, температуры пирогаза на входе и выходе радиантной секции пирозмеевика, температура на перевале  $j$ -й камеры печи, температура стенки пирозмеевика, давление топливного газа, поступающего в  $j$ -ю камеру, давление воздуха контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИП и А) на клапанах подачи топливного газа, лабораторно контролируемые составы пирогаза на выходе  $j$ -й камеры и в общем пирогазовом коллекторе, расходы целевых и побочных продуктов на выходе установки, давления в линиях всасывания и нагнетания и скорость вращения ротора турбины первой ступени пирогазового компрессора.

Разработанные в 1980—1990 гг. АСУТП ЭП-300 устарели и физически, и морально. В связи с этим на многих предприятиях внедряются мероприятия, направленные на повышение эффективности функционирования крупнотоннажных этиленовых установок (КЭУ): создание собственных [1] или использование покупных [2] информационно-моделирующих систем (ИМС) пиролиза. Например, в работе [2] планируется использование ИМС SPYRO Suite 7 фирмы Technip для управления процессом пиролиза в режиме реального времени. В работе [3] выполнен подробный анализ современного состояния работ по моделированию и оптимизации КЭУ. В них рассмотрено применение глобальной системы GPROMS для моделирования и оптимизации процесса пиролиза, реализована настройка кинетики пиролиза в ИМС GPROMS добавлением новых компонентов и схем реакций между ними. Математическая модель (ММ) процесса пиролиза в промышленной печи SRT-VI, основанная на молекулярно-кинетическом механизме, описана в работах [4, 5]. В работах [3, 6] разработана ММ процесса и проведена оптимизация режима КЭУ типа ЭП-450 на основе измеряемых один раз в смену физических свойств бензинового сырья — плотности и разгонки по Энглеру. Показана высокая эффективность и надёжность реализации этих решений в АСУТП. Общим недостатком работ [1, 2, 4, 5] и аналогичных им является то, что в АСУТП в режиме реального времени проблематично применять сложные ММ, использующие информацию о покомпонентном или групповом составе бензинового сырья и основанные на радикально-цепном или молекулярно-кинетическом механизме термической деструкции углеводородов. А для реализации положений по оптимизации, разработанных в работе [3], требуется модернизация сырьевого парка, заключающаяся в установке дополнительных ёмкостей для бензина и перемешивающих насосов, что не всегда возможно на действующем производстве. В свете изложенного настоящая работа актуальна, так как направлена на повышение эффективности функционирования КЭУ за счёт использования в АСУТП ЭП-300 упрощённых и надёжных ММ, основанных, тем не менее, на физико-химических закономерностях процесса пиролиза.

**Модель процесса.** Разработанная ММ основана на кинетической схеме, показанной на рис. 1. В схеме принято разложение бензина (Бен) на пять продуктов: этилен ( $C_2H_4$ ), пропи-

лен ( $C_3H_6$ ), фракцию углеводородов  $C_4$  (фр.  $C_4$ ), тяжёлые жидкие и лёгкие газообразные продукты (ЛГП);  $R_j$  — скорости реакций образования веществ. Отличием кинетической схемы от известной [7] является введение связи  $R_{14}$ , отображающей прямое превращение в процессе пиролиза бензинового сырья в ТЖП.

Химический процесс пиролиза и охлаждения пирогаза описывается системой обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dl} &= -[R_1(T) + R_2(T) + R_3(T) + \\ &+ R_4(T)]x_1 v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \\ \frac{dx_2}{dl} &= \{R_3(T)x_1 - [R_6(T) - R_7(T) + R_{10}(T) + \\ &+ R_{13}(T)]x_2\} v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \\ \frac{dx_3}{dl} &= \{R_2(T)x_1 + R_6(T)x_2 - [R_5(T) + R_9(T) + \\ &+ R_{12}(T)]x_3\} v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \\ \frac{dx_4}{dl} &= \{R_1(T)x_1 + R_7(T)x_2 - R_5(T)x_3 - \\ &- [R_8(T) + R_{11}(T)]x_4\} v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \\ \frac{dx_5}{dl} &= [R_{10}(T)x_2 + R_9(T)x_3 + R_8(T)x_4 + \\ &+ R_{14}(T)x_1] v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \\ \frac{dx_6}{dl} &= [R_4(T)x_1 + R_{13}(T)x_2 + R_{12}(T)x_3 + \\ &+ R_{11}(T)x_4] v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}); \quad (1) \\ \frac{dT}{dl} &= \left\{ \alpha \frac{a^2}{\sum_1^G F_g} \sum_{g=1}^G \frac{F_g}{a^2 + (\bar{l} - g/G)^2} C_{0\varepsilon\varepsilon_{CT}} \times \right. \\ &\times (T_m + T_{CT})(T_m^2 + T_{CT}^2) \cdot 10^{-8} (T_m - T) \pi d \left. \right\} / [\alpha + \\ &+ \frac{a^2}{\sum_1^G F_g} \sum_{g=1}^G \frac{F_g}{a^2 + (\bar{l} - g/G)^2} C_{0\varepsilon\varepsilon_{CT}} \times \\ &\times (T_m + T_{CT})(T_m^2 + T_{CT}^2) \cdot 10^{-8}] - \\ &- F^B \sum_1^6 h_i \frac{dx_i}{dl} \left\{ \frac{1}{C_p (F^B + F^{\Pi})} \right\}; \\ P(l) &= P(0) - l/25, \\ \frac{dT_z}{dl} &= \pi d_z K_T (T_{xл} - T_z) / C_p \sum_{m=1}^2 (F_m^B + F_m^{\Pi}). \quad (2) \end{aligned}$$

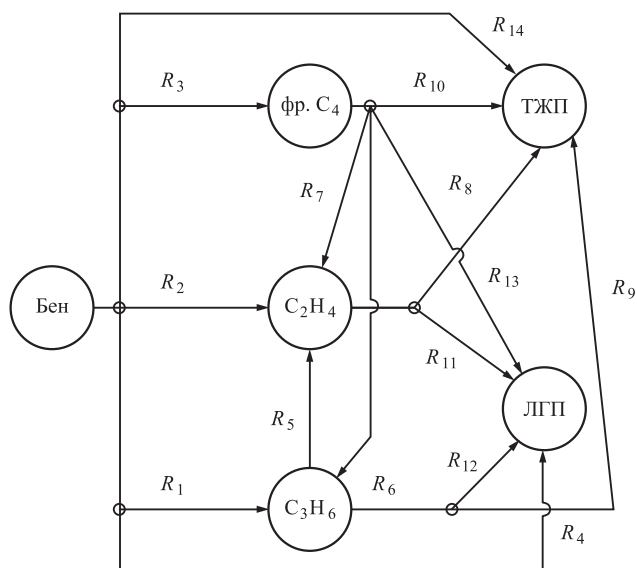


Рис. 1. Принятая кинетическая схема процесса пиролиза

Начальные условия:  $x_1(0) = 1$ ;  $x_i(0) = 0$ ;  $i = 2, \dots, 6$ ;  $T(0) = 803 \text{ K}$ ;  $T_z(0) = T_{\text{кон}} = 1103 \dots 1123 \text{ K}$ ;  $P(0) = 0,51 \text{ МПа}$ . В приведённых формулах используются следующие обозначения:  $l$  — текущая длина змеевика SRT-I,  $0 \leq l \leq L$ ,  $L$  — длина радиантной части змеевика SRT-I, равная  $75 \text{ м}$ ;  $x_1 \dots x_6$  — мольные концентрации бензина, фракции  $C_4$ , пропилена, этилена, ТЖП и ЛГП соответственно;  $T$  — температура смеси в реакторе;  $d_z$ ,  $L_z$  — диаметр и длина трубки ЗИА соответственно;  $K_T$  — коэффициент теплоотдачи;  $C_p$  — теплоёмкость влажного пирогаза;  $F^B$ ,  $F^{\Pi}$  — расходы бензина и пара в змеевик соответственно;  $T$ ,  $T_z$  — температуры пирогаза в змеевике и ЗИА соответственно;  $T_{\text{хл}}$  — температура хладагента;  $T_{\text{кон}}$  — температура пирогаза на выходе печи;  $K$ ;  $\pi$  — число, равное  $3,14$ ;  $\bar{l} = l/75$ ;  $g$  — порядковый номер источника тепла;  $G$  — число источников тепла;  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи от внешней поверхности трубы к потоку;  $a$  — коэффициент;  $C_0$  — постоянная излучения абсолютно чёрного тела;  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_{\text{ст}}$  — степени черноты топки и стенки пиро-змеевика соответственно, принятые равными  $0,8$ ;  $F_g$  — расход топлива в  $g$ -й источник тепла;  $h_i$  — теплота образования  $i$ -го вещества.

Функции  $R_j$  характеризуют скорости реакций образования продуктов пиролиза. Значения констант этих функций приведены в таблице.

После небольшого преобразования известной формулы Аррениуса для константы скорости радиации выражение для  $R_j$  будет иметь следующий вид:

$$R_j(T) = U_j \exp(23 - E_j/T).$$

Зависимость  $v = v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi})$ , фигурирующая в первых шести уравнениях системы (1), имеет вид

$$v(x_1, \dots, x_6, T, F^B, F^{\Pi}) = 900\pi d^2 \frac{T_0 P(l) m_0 \sum_1^6 m_i x_i}{V_{\text{AB}} P_0 T \left( m_0 F^B + F^{\Pi} \sum_1^6 m_i x_i \right)},$$

где  $P(l)$  — текущее давление;  $d = 0,106$  — внутренний диаметр змеевика SRT-I,  $\text{м}$ ;  $V_{\text{AB}} = 22,4$  — объём Авогадро;  $T_0 = 273 \text{ K}$  — нормальная температура;  $P_0 = 1,04 \text{ ст. атм. (0,105 378 МПа)}$  — нормальное давление;  $m_i$ ,  $i = 1, 6$ , — молекулярная масса  $i$ -го продукта пиролиза;  $m_0$  — молекулярная масса водяного пара;  $F^B = 0,78 \text{ кг/с (2800 кг/ч)}$ ;  $F^{\Pi} = 0,39 \text{ кг/с (1400 кг/ч)}$ .

Теплоёмкость влажного пиролизного газа рассчитывается по формуле

$$C_p = \frac{1}{4,19(F^B + F^{\Pi})} \times \left( \frac{F^{\Pi} (A_0 + B_0 T_i + C_0 T_i^2 + D_0 T_i^3)}{m_0} + \frac{F^B \sum_{k=1}^6 (A_k + B_k T_i + C_k T_i^2 + D_k T_i^3) x_k}{\sum_{k=1}^6 m_k x_k} \right),$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  — коэффициенты зависимости теплоёмкости вещества при постоянном давлении от температуры, приведённые в справочной литературе.

#### Кинетические константы уравнений реакций пиролиза бензина

$j$	$U_j, \text{с}^{-1}$	$E_j, \text{K}$
1	15,19	25 000
2	8,1827	25 000
3	13,198	25 000
4	3,5433	25 000
5	4723,7	40 000
6	423,7	40 000
7	204,41	40 000
8	0,14668E-5	20 000
9	0,12747E-1	20 000
10	0,89727E-1	20 000
11	0,54276E-5	20 000
12	0,24012E-1	20 000
13	0,59205E-5	20 000
14	0,1E-2	20 000

Пирогазовый компрессор связан с пиролизными печами через ЗИА и аппаратуру узла первичного фракционирования пирогаза (УПФ). Давления на входе в компрессор для чистой и закоксованной аппаратуры (змеевиков печей, трубок колонн масляной и водной промывки пирогаза, соединительных трубопроводов, на которых с течением времени откладываются пиролизная смола и кокс) ЗИА соответственно равны:

$$P_C = a_1 - \psi_{DP}; \quad P_C = a_2 - \psi_{DP}, \quad (3)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — коэффициенты уравнений связи, определяются экспериментально; их значения лежат в диапазоне 0,25...0,45, например  $a_1 = 0,339$ ;  $a_2 = 0,376$ .

Перепад давлений в радиантной секции пиролизного змеевика  $\psi_{DP}$  пропорционален квадрату мольного расхода:

$$\psi_{DP} = k_{DP} \left( \frac{F^B}{M_M} + \frac{F^B f}{18} \right)^2, \quad (4)$$

где  $k_{DP}$  — коэффициент пропорциональности, значение которого для печи SRT-I укладывается в диапазон  $0,2 \cdot 10^{-3} \leq k_{DP} \leq 0,3 \cdot 10^{-3}$  и мало зависит от пробега печи, при моделировании принято значение  $k_{DP}$ , равное  $0,275 \cdot 10^{-3}$ ;  $M_M$  — молекулярная масса бензинового сырья, для расчёта которой в работах [3, 6] предложен ряд формул, позволяющих с высокой достоверностью оценить этот параметр;  $f$  — массовое отношение пар/сырьё (бензин или этан).

Парциальное давление продуктов пиролиза на выходе из печи оценивается по формуле

$$\psi_{PP} = P_{\text{вых}} \left( \frac{F^B k_{RAS}}{M_M} + \frac{F^B f}{18} \right). \quad (5)$$

В этой формуле  $k_{RAS}$  — степень расширения сырья в реакционной зоне пирозмеевика, определяется по результатам анализа состава пирогаза. Для змеевика SRT-I  $k_{RAS} = 2,8...3,1$ . Давление пирогаза на выходе из печи

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} - \psi_{DP}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{вх}}$  — давление на входе в радиантную часть змеевика печи.

**Постановка оптимизационной задачи.** Оптимизация режима работы блока бензиновых печей реализуется в АСУТП в несколько этапов.

1. В зависимости от рыночной ситуации формируется экономический критерий  $\Theta$  работы КЭУ, выявляются ограничения, накладываемые на сформированный критерий, в том числе на значения управляющих воздействий, плановые задания на выпуск целевых продуктов, ограничения, накладываемые на состав пирогаза [3] последующими узлами КЭУ:

$$\Theta = \sum_{i=1}^I k_i \Pi_i G_i - \sum_{j=1}^J Z_j \xrightarrow{T_l, F_l^B, F_l^{\Pi}, P_C} \max; \quad (7)$$

$$G_m = G_m^*; \quad \sum_{l=1}^N F_l^B = F_{\text{зад}}^B;$$

$$G_g = 0,01 F_{\text{зад}}^B \sum_{k=1}^{K_g} \alpha_{kg} B_k \leq G_g^{\max};$$

$$G_i = 0,01 F_{\text{зад}}^B B_i;$$

$$P_C \geq P_C^{\min}; \quad F_{\min}^B \leq F_l^B \leq F_{\max}^B;$$

$$F_{\min}^{\Pi} \leq F_l^{\Pi} \leq F_{\max}^{\Pi}; \quad T_{\min} \leq T_l \leq T_{\max},$$

где  $k_i$ ,  $\Pi_i$ ,  $G_i$  — коэффициент извлечения, цена и выпуск  $i$ -го продукта соответственно;  $Z_j$  — затраты  $j$ -го вида на получение продуктов пиролиза;  $I$  — число товарных продуктов;  $J$  — число видов затрат;  $l$  — индекс змеевика;  $N$  — общее число змеевиков;  $G_m^*$  — задание на выпуск  $m$ -го целевого продукта;  $F_{\text{зад}}^B$  — уточняемое задание по общему расходу бензина на пиролизные печи;  $G_g$  — способность  $g$ -го узла переработать определённую массу  $G$  поступающих в него продуктов пиролиза;  $B_i$  — выход  $i$ -го продукта, % мас.;  $P_C^{\min}$  — минимальное значение давления на всасе первой (входной) ступени компрессора, обусловленное безопасностью производства;  $B_k$  — массовая концентрация  $k$ -го продукта в потоке продуктов  $G$ ;  $\alpha_{kg}$  — коэффициенты, характеризующие способность  $g$ -го узла переработать  $k$ -й продукт пиролиза;  $k$  — номер продукта, на выпуск которого накладывается ограничение  $g$ -м узлом;  $K_g$  — число таких продуктов в  $g$ -м узле.

Основные затраты формируются исходя из стоимости бензина:  $Z_B = \Pi_B F_{\text{зад}}^B$ .

Путём максимизации экономического критерия работы КЭУ в условиях наложенных ограничений и плановых заданий с использованием разработанной ММ процесса пиролиза (1)...(3) определяются оптимальные значения температуры пирогаза на выходе из печи, расходов сырья и пара в змеевик печи, давление на всасе пирогазового компрессора. При этом уточняются требуемый расход бензина в реакторный пиролизный блок и степень разбавления бензина водяным паром. Задача (7) решается с использованием методов конфигураций Хука—Дживса и штрафных функций.

2. На основе рассчитанных оптимальных значений температуры и давления на всасе компрессора формируются задания регуля-

торам температуры пирогаза на выходе камер печей и регулятору скорости вращения турбины первой ступени пирогазового компрессора. Зависимость давления на всасе от скорости вращения турбины описывается эмпирическим уравнением  $\varepsilon - a_1 + a_2q + a_3n + a_4q^2 + a_5n^2 + a_6qn + a_7(qn)^{-2} + a_8/(qn) = 0$ ;  $q = Q/1000$ ;  $n = N/1000$ ;  $\varepsilon = P_{C_{\text{вых}}}/P_C$  — степень сжатия первой ступени;  $Q$  — расход пирогаза на всасе компрессора;  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $N$  — скорость вращения турбины первой ступени,  $1/\text{с}$  (об/мин);  $a_1 \dots a_8$  — коэффициенты модели степени сжатия.

Уравнение решается методом последовательных приближений, результат — наименьшее положительное число, входящее в диапазон изменения расхода газа на всасе  $Q_{\text{min}} \leq Q \leq Q_{\text{max}}$ .

3. Уточнённый на этапе 1 расход бензина в реакторный блок далее распределяется между камерами пиролизных печей и отдельными змеевиками таким образом, чтобы реализовать идентичные режимы закалки пирогаза в ЗИА и пиролиза в змеевиках. В первом случае в качестве звена объекта управления рассматриваются два потока камеры печи, связанных с  $k$ -м ЗИА  $j$ -й камеры, во втором — отдельный пирозмеевик. Задачей распределения является минимизация суммы квадратов отклонений показателя идентичности процесса в отдельной камере (змеевике) от среднего значения по всем камерам (змеевикам). Распределение сырья между камерами пиролизных печей и змеевиками в целях выравнивания режимов закалки пирогаза и жёсткости процесса пиролиза позволяет сократить потери, связанные с неравномерностью закоксовывания ЗИА и змеевиков. В качестве показателя закоксованности  $k$ -го ЗИА принята величина  $D_k = L_z \pi d_{z,k} K_{\tau,k} / C_p$ , которая определяется из аналитического решения уравнения (2) после подстановки в него измеренных на  $n$ -м шаге работы управляющей подсистемы значений расходов сырья, пара, температур пирогаза на выходах печи и ЗИА, температуры хладагента:

$$D_k^{n+1} = \sum_{l=1}^2 (F_l^{\text{Bn}} + F_l^{\text{Пn}}) \ln \left( \frac{T_z^n(0) - T_{\text{хл}}}{T_{z,k}^n - T_{\text{хл}}} \right).$$

Общий расход бензина распределяется между камерами работающих печей в зависимости от закоксованности ЗИА каждой камеры в условиях регламентных и технологических ограничений:

$$\sum_{k=1}^{N/2} (D_{k\text{cp}} - D_k^{n+1})^2 \frac{1}{F_k^{\text{B}}, F_k^{\text{П}}, T_k} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где  $D_{k\text{cp}}$  — среднее значение показателя закоксованности змеевиков печных камер при  $\sum_{k=1}^{N/2} F_k^{\text{B}} = F_{\text{зад}}^{\text{B}}$ ;  $F_{\text{min}}^{\text{B}} \leq F_k^{\text{B}}/2 \leq F_{\text{max}}^{\text{B}}$ ;  $F_{\text{min}}^{\text{П}} \leq F_k^{\text{П}}/2 \leq F_{\text{max}}^{\text{П}}$ ;  $T_{\text{min}} \leq T_k = T_z^n(0) \leq T_{\text{max}}$ .

4. Расход сырья в каждую камеру распределяется между змеевиками в зависимости от их закоксованности в условиях регламентных и технологических ограничений. Целью этого этапа является стабилизация в змеевиках идентичного технологического режима, обеспечивающего максимальную близость их эксплуатационных характеристик и составов получаемых продуктов. В качестве критерия для оценки идентичности режимов в отдельных змеевиках пиролизных печей или камер принята величина

$$I_d = \sum_{v=1}^{n_1} \gamma_v \sum_{l=1}^{n_2} (P_v^* - P_{vl})^2, \quad (9)$$

где  $P_{vl}$  — текущее значение  $v$ -го параметра, характеризующего технологический режим для  $l$ -го реакционного змеевика;  $P_v^*$  — заданное значение  $v$ -го параметра;  $\gamma_v$  — весовые коэффициенты;  $v$  — номер показателя, по которому оценивается идентичность технологического режима;  $n_1$  — общее число показателей;  $l, n_2$  — номер потока и общее число потоков в печи или камере соответственно.

Показателями  $P_{vl}$  выбираются такие, текущие значения которых оценивают по результатам непосредственных измерений одной или нескольких величин на объекте, например перепад давлений (4), парциальное давление (5).

Ограничения на независимые переменные — расходы сырья и пара в печь, температуру пирогаза на выходе из печи записываются в виде

$$\begin{aligned} F_{\text{min}}^{\text{B}} \leq F_l^{\text{B}} \leq F_{\text{max}}^{\text{B}}; \quad f^{\text{min}} \leq f \leq f^{\text{max}}; \\ T^{\text{min}} \leq T_l \leq T^{\text{max}}; \quad f = f^*; \quad \sum_{l=1}^{n_2} F_l^{\text{B}} = F_{\text{B}}^*, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $f^*$ ,  $F_{\text{B}}^*$  — оптимальные значения отношения пар/сырьё (бензин или этан) и расхода бензина в камеру соответственно.

Таким образом, в общем случае задача управления технологическим режимом в одной камере заключается в отыскании значений управляющих воздействий для индивидуальных пирозмеевиков, дающих минимальное значение критерия (9) при ограничениях

(10) и уравнениях связи между переменными, например (4)...(6).

**Результаты моделирования и испытаний.** Идентификация ММ (1) в АСУТП может быть реализована как на основе лабораторных анализов по составу пирогаза в общем коллекторе, так и путём измерения расходов потоков продуктов с учётом потерь продуктов при

разделении пирогаза в отделении ректификации. При идентификации уточняются значения величин  $U_i$  и  $E_i$  в соответствии с квадратичным критерием:

$$\sum_{n=1}^{n_3} \sum_{i=1}^6 \left( 1 - \frac{B_{ni}(\mathbf{U}, \mathbf{E})}{B_{ni}^{\text{экс}}} \right)^2 \xrightarrow{\mathbf{U}, \mathbf{E}} \min,$$

где  $n_3$  — число экспериментов (экс);  $\mathbf{U}, \mathbf{E}$  — векторы кинетических параметров ММ.

Задача решена методом конфигураций Хука—Дживса.

На рис. 2 показаны результаты моделирования процесса пиролиза в змеевике SRT-I с помощью разработанной модели при рассчитанных оптимальных значениях температуры на выходе печи 1123 К, расхода бензина в печь 6,22 кг/с, расхода пара 3,11 кг/с, давления на всасе пирогазового компрессора 0,15 МПа. Общий оптимальный расход бензина в реакторный блок составил 43,56 кг/с.

Результаты, полученные при оптимальном и регламентном распределении бензина между шестью пиролизными камерами на действующем производстве приведены на рис. 3.

По сравнению с регламентным оптимальное управление позволяет увеличить массовый выход этилена в общем пирогазовом коллекторе на 0,5 %, а в управляемых печах почти на 1 %.

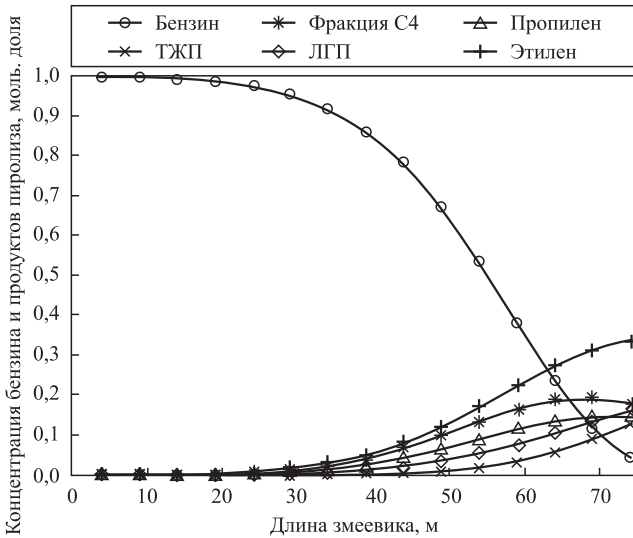
Наиболее часто задача оптимального распределения сырья между пиролизными змеевиками заключается в минимизации суммы квадратов отклонений температуры пирогаза на выходе змеевиков от оптимальной и давления сырья на входе в змеевики от их среднего значения при заданном расходе сырья в печь в условиях ограничений:

$$\sum_{l=1}^2 \gamma^P (\tilde{P} - P_l(F_{Sl}))^2 + \gamma^T (T^* - T_l(F_{Sl}))^2 \xrightarrow{F_{Sl}} \min \quad (11)$$

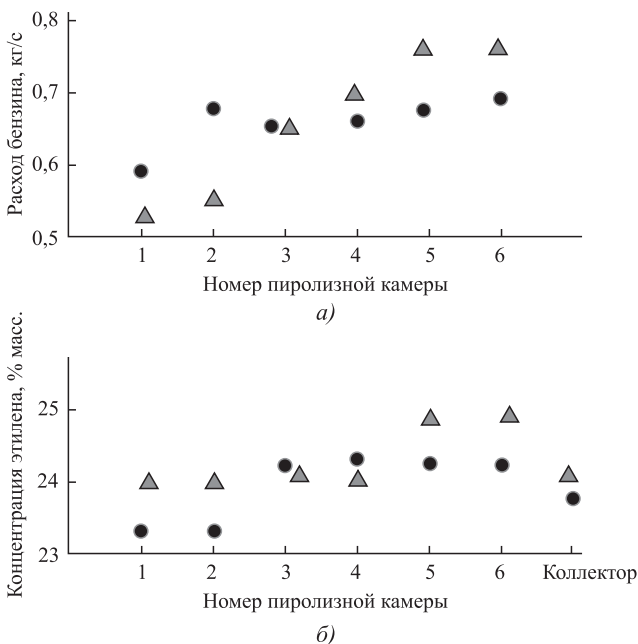
при

$$\sum_{l=1}^2 F_{Sl} = F_S^*; F_S^{\min} \leq F_{Sl} \leq F_S^{\max}; \tilde{P} = 0,5 \sum_{l=1}^2 P_l, \quad (12)$$

где  $F_{Sl}$  — расход сырья (бензина или этана) в  $i$ -й змеевик, кг/ч;  $\gamma^P, \gamma^T$  — весовые коэффициенты для давления и температуры соответственно;  $\tilde{P}$  — среднее значение давления сырья на входе в змеевик, кПа;  $F_S^*, T^*$  — оптимальные значения расхода сырья в камеру и температуры на выходе печи соответственно.



**Рис. 2.** Изменение концентрации бензина и продуктов по длине змеевика SRT-I



**Рис. 3.** Результаты оптимизации распределения бензина между шестью камерами печей SRT-I:

*a* — расходы бензина в камеры печей при оптимальном и регламентном распределениях; *b* — концентрация этилена на выходе из камер и в общем пирогазовом коллекторе при оптимальном и регламентном распределениях бензина;  $\blacktriangle$  — оптимальное распределение;  $\bullet$  — регламентное распределение

С учётом математических моделей для отдельных змеевиков [4, 5] задача оптимизации (11) запишется в виде

$$\sum_{l=1}^2 \gamma^P (\tilde{P} - K_{1l}^P - K_{2l}^P F_{Sl} - K_{3l}^P F_{Sl} f)^2 + \gamma^T (T_k^* - K_{1l}^T - K_{2l}^T F_{Sl} - K_{3l}^T F_{Sl} f - K_{4l}^T T_k^*)^2 \xrightarrow{F_{Sl}} \min, \quad (13)$$

где  $K^P$  и  $K^T$  — коэффициенты регрессионных моделей зависимости давления на входе в змеевики и температуры на выходе змеевиков от расходов сырья и пара и общей температуры пирогаза на выходе из печи, которая регулируется подачей топлива.

Задача (13) решена аналитически методом неопределённых множителей Лагранжа. В результате получено выражение для расчёта расхода сырья (бензина или этана) в  $l$ -й змеевик камеры

$$F_l^{S*(B, \Theta)} = (A_l + \lambda) / D_l,$$

где  $\lambda$  — неопределённый множитель Лагранжа,

$$\lambda = \left( F_k^{*S} \prod_{l=1}^2 D_l - \prod_{l=1}^2 D_l \sum_{l=1}^2 A_l D_l^{-1} \right) / \left( \prod_{l=1}^2 D_l \sum_{l=1}^2 A_l D_l^{-1} \right), \quad (14)$$

$$A_l = \gamma^P (\tilde{P} - K_{1l}^P) (K_{2l}^P + K_{3l}^P f) + \gamma^T (T_k^* - K_{1l}^T - K_{4l}^T T_k^*) (K_{2l}^T + K_{3l}^T f), \quad (15)$$

$$D_l = \gamma^P (K_{2l}^P + K_{3l}^P f)^2 + \gamma^T (K_{2l}^T + K_{3l}^T f)^2. \quad (16)$$

Производственная проверка оптимальной стабилизации температуры на выходе змеевиков по формулам (13)...(16) показала уменьшение разброса температуры на выходе змеевиков с  $\pm 4...6$  до  $\pm 0,8...1,2$  °C и увеличение времени пробега печи на 110 ч.

**Заключение.** Разработана и исследована ММ пиролиза бензина, предназначенная для оптимального управления пиролизными печами SRT-I в АСУТП ЭП-300, определены её кинетические параметры. Идентификация ММ реализуется как на основании лабораторных анализов состава пирогаза в общем коллекторе, так и на основе измеренных зна-

чений расходов потоков продуктов. На основе ММ поставлена и решена задача по оптимальному управлению реакторным блоком пиролизных печей в производстве ЭП-300, которое позволило обеспечить увеличение выхода этилена на 1 %, а пробег печи на 110 ч. При реализации в АСУТП задача оптимизации блока печей на основе экономического критерия запускается на выполнение в режиме «по требованию», распределение бензина между камерами печей осуществляется один раз в 2—3 суток, а задача оптимальной стабилизации режима пиролиза в змеевиках запускается 1 раз в 2—4 мин.

### Библиографические ссылки

1. Шевченко И.Ю. Управление сложным нефтехимическим промышленным производством на основе математического моделирования и современных информационных технологий // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. Т. 122. № 12. С. 146—150.
2. Прозорова О.Б. Совершенствование производства этилена в ОАО «Салаватнефтеоргсинтез»: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Уфимский государственный нефтяной технический университет. Уфа, 2011. 24 с.
3. Арапов Д.В. Оптимизация пиролизных печей типа SRT-VI крупнотоннажной этиленовой установки // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 244—256.
4. Арапов Д.В., Тихомиров С.Г., Подвальный С.Л., Курицын В.А., Карманова О.В. Математическое моделирование промышленных процессов пиролиза бензина в трубчатых печах // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 6. С. 649—662.
5. Arapov D.V., Tikhomirov S.G., Podvalny S.L., Kuritsyn V.A. Mathematical model of large-tone pyrolysis installations in production of ethylene // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series 1202(2019) 012024. DOI: 10.1088.1742-6596/1202/1/012024.
6. Kuritsyn V.A., Arapov D.V., Ekimova A.M., Yakupov A.A. Modeling of pyrolysis of straight-run naphtha in a large-capacity type SRT-VI furnace // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2008. Vol. 44. No. 3. P. 180—189.
7. Тучинский М.Р., Родных Ю.В. Автоматизированные системы управления производством олефинов. М.: Химия, 1985. 304 с.

### Ссылка для цитирования

Арапов Д.В., Курицын В.А. Оптимизация режима реакторного блока пиролизных печей SRT-I для производства этилена // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 153—159.

УДК 621.852:620.179.1

**И.Ф. Янгиров**, д-р техн. наук, **А.Р. Халиков**, канд. физ.-мат. наук  
(Уфимский государственный авиационный технический университет),  
**Р.А. Сафиуллин**, канд. физ.-мат. наук  
(Башкирский государственный университет, Нефтекамский филиал)  
yangirov@yandex.ru

## ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЁЖНОСТИ КЛИНОРЕМЁННОЙ ПЕРЕДАЧИ ДВИГАТЕЛЯ СТАНКА-КАЧАЛКИ ДЛЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ

*Разработана теория неразрушающего контроля ленточной ремённой передачи привода станка-качалки по методу «нагрузка—прочность», в основе которого лежит применение коэффициентов вариации нагрузки, вариации несущей способности и коэффициента необходимого запаса прочности, которые заложены при проектировании исходного привода. Возможно использование этих параметров в зависимости от требований проектируемого привода рабочих механизмов от электродвигателя.*

**Ключевые слова:** станок-качалка; электропривод; ленточная ремённая передача.

*The non-destructive control theory of the belt transmission for the conventional pumping unit drive by the «load-strength» method is developed, which is based on the use of load variation coefficients, load-carrying capacity variations and the coefficient of the necessary safety factor, which were laid down in the design of the initial drive. It is possible to use these parameters depending on the requirements of the designed drive for the working mechanisms from the electric motor.*

**Keywords:** conventional pumping unit; electric drive; belt transmission.

**Введение.** Требования к надёжности ремённой передачи станка-качалки (СК) для добычи нефти имеют большое производственное значение. Особое внимание обращается на недопустимость обрыва ремённой передачи от шкива двигателя к СК. В связи с этим стали выделять механическую надёжность передаточного механизма. Под механической надёжностью понимается вероятность  $P_0$  неразрушения конструкции передаточного механизма в течение выполнения задания, т. е. добычи определённого объёма нефти.

Требуемая механическая надёжность ленточной передачи  $P_0$  может достигать значения 0,9999. При этом механическая надёжность передачи тесно связана с прочностными характеристиками всей конструкции СК.

В основу оценки механической надёжности элементов конструкции любой ленточной передачи положен метод «нагрузка—прочность» [1]. Параметры действующей на элемент ленты нагрузки считаются заданными. При этом прочностной расчёт сводится к определению коэффициента запаса несущей способности относительно максимально возможного значения внешней нагрузки. Для получения вероятностных оценок в этом случае необходимо определить среднее значение несущей способности ленточной механической передачи  $\bar{R}$  (среднее значение нагрузки на ленту) и коэффициент её вариации  $v_R$ . Оценки величин  $\bar{R}$  и  $v_R$  можно получить с помощью формул проч-

ностного расчёта, связывающих значения нагрузок, действующих на ленту, её геометрические параметры, прочностные характеристики используемых материалов с возникающими при этом механическими напряжениями.

**Математическая модель.** Несущая способность ленты определяется согласно модели пластичных материалов с помощью выражения для наибольшего напряжения  $\sigma_{\text{наиб}}$ , возникающего в ленточной конструкции, путём приравнивания его пределу прочности  $\sigma_{\text{пр}}$ . Таким образом, несущая способность связана с пределом прочности выражением  $\sigma_{\text{наиб}} \leq \sigma_{\text{пр}}$ , где  $\sigma_{\text{наиб}} = (M_{\text{max}}/I_x)y_{\text{наиб}} = M_{\text{max}}/W_x \leq \sigma_{\text{пр}}$ ,  $W_x = I_x/y_{\text{наиб}}$  — осевой момент сопротивления,  $I_x = bh^3/3$  — момент инерции ленты в направлении  $x$ ,  $y_{\text{наиб}}$  — наибольшее расстояние от центра масс ленты,  $M_{\text{max}}$  — максимальный изгибающий момент;  $\sigma_{\text{пр}}$  — предел прочности (продольное напряжение в точках наружной поверхности ленты или напряжения изгиба).

В свою очередь,  $M_{\text{max}} = F_{\text{max}}l$ , где  $M_{\text{max}}$  — максимальный изгибающий момент внешней нагрузки  $F_{\text{max}}$ ;  $l$  — плечо силы  $F_{\text{max}}$  относительно центра масс ленты [1]. Выражение для максимального момента, необходимого для выпрямления оси ленты, имеет вид [2]

$$M_{\text{max}} = \sigma_{\text{наиб}} W_x = \sigma_x \frac{bh^2}{6}, \quad (1)$$

где  $b$  — толщина ленты;  $h$  — ширина ленты.



Формулу (1) можно записать через радиус наружной поверхности (поперечного сечения, проходящего через углы ленты):

$$M_{\max} = F_{\max} r, \quad (2)$$

где  $F_{\max}$  — максимальное усилие для раскручивания и закручивания ленты;  $r$  — радиус шкива.

Тогда с учётом того, что реальная модель ленточной передачи представляется в виде коаксиально расположенных колец, что с некоторой точностью вполне справедливо, если исходить из одинаковости прочностных соотношений для кольца и намотанной на маховик ленты [2], выражение для максимального напряжения будет иметь вид

$$\sigma_{\text{наиб}} = 0,318 \frac{F_{\max} r}{bh^2}. \quad (3)$$

Согласно работе [2] несущую способность круговой ленты можно приравнять к максимальному усилию:

$$R = F_{\max} = 0,524 \frac{\sigma_{\text{пр}} bh^2}{r}. \quad (4)$$

Если предположить, что значения средней нагрузки на ленту и максимального усилия равны между собой,  $\bar{R} = \bar{F}_{\max}$  при различных значениях коэффициента вариации  $v_R$  между ними, то остаётся определить математическое ожидание  $m_R$  и дисперсию несущей способности  $D(R)$ . Так как все параметры, входящие в выражение (4), являются случайными величинами, то при жёстких допусках на размеры и прочностные характеристики их можно найти только с определённой вероятностью. Для случая натянутой ленты как модели системы взаимосвязанных коаксиальных колец получим уравнение, совпадающее с выражением, полученным в работе [3] для колец,

$$m_R = \bar{R} = \bar{F}_{\max} = 0,524 \frac{m_{\text{спр}} m_b m_h^2}{m_r}, \quad (5)$$

где  $m_{\text{спр}}$ ,  $m_b$ ,  $m_h$ ,  $m_r$  — математические ожидания предела прочности и размеров ленты.

Для оценки коэффициента вариации несущей способности необходимо определить её дисперсию. Значение последней зависит от многих случайных величин: коэффициента вариации прочностных характеристик материалов колёс, геометрических размеров, уровня оснащённости производства. Аналитическая оценка дисперсии функции, представляющей собой

произведение нескольких случайных функций в различных степенях, осуществляется с помощью предварительной её линеаризации путём разложения в ряд Тейлора в точке математического ожидания [4], где все параметры принимают номинальные значения. Отклонение значения несущей способности от математического ожидания определяется выражением

$$\Delta R = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial X_k} \right) \Delta X_k, \quad (6)$$

где  $\Delta X_k$  — приращение  $k$ -го параметра.

Прочностные свойства материала и отклонения отдельных размеров спирали при изготовлении не коррелированы, поэтому сумма квадратов отклонений

$$\sum_{k=1}^n (\Delta R_k)^2 = \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial R}{\partial X_j} \right)^2 \sum_{k=1}^n (\Delta X_j)^2 k, \quad (7)$$

где  $n$ ,  $m$  — натуральные числа — числа отклонений значений несущей способности от её математического ожидания и отдельных размеров спирали при её изготовлении.

Из выражения (7) нетрудно найти коэффициент вариации несущей способности [5]:

$$v_R = \sqrt{\frac{D(R)}{m^2(R)}}, \quad (8)$$

где  $D(R) = \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial R}{\partial X_j} \right)^2 D(X_j)$ .

Рассмотрим частные производные несущей способности по каждому параметру:

$$\frac{\partial R}{\partial \sigma_{\text{пр}}} = 0,524 \frac{m_b m_h^2}{m_r};$$

$$\frac{\partial R}{\partial r} = -0,524 \frac{m_{\text{спр}} m_b m_h^2}{m_r^2};$$

$$\frac{\partial R}{\partial \sigma_b} = 0,524 \frac{m_{\text{спр}} m_h^2}{m_r};$$

$$\frac{\partial R}{\partial h} = 0,524 \frac{2m_{\text{спр}} m_b m_h}{m_r};$$

$$D(R) = 0,524^2 \left( \frac{m_b^2 m_h^4}{m_r^2} D(\sigma_{\text{пр}}) + \frac{m_{\text{спр}}^2 m_b^2 m_h^4}{m_r^4} D(r) + \frac{m_{\text{спр}}^2 m_h^4}{m_r^2} D(\sigma_b) + \frac{4m_{\text{спр}}^2 m_b^2 m_h^4}{m_r^2} D(h) \right).$$

Подставляя последние выражения в соотношение (8) и проводя преобразования, получим выражение для коэффициента вариации несущей способности

$$v_R = \sqrt{\frac{D(\sigma_{\text{пп}})}{m_{\text{пп}}^2} + \frac{D(r)}{m_r^2} + \frac{D(b)}{m_b^2} + 4 \frac{D(h)}{m_h^2}},$$

или окончательно

$$v_R = \sqrt{v_{\text{спр}}^2 + v_b^2 + v_r^2 + v_h^2}, \quad (9)$$

где  $v_{\text{спр}}^2 = \frac{D(\sigma_{\text{пп}})}{m_{\text{пп}}^2}$ ,  $v_b^2 = \frac{D(b)}{m_b^2}$ ,  $v_r^2 = \frac{D(r)}{m_r^2}$ ,  $v_h^2 = 4 \frac{D(h)}{m_h^2}$  — квадраты коэффициентов вариации показателей прочности и размеров ленты.

Таким образом, исходя из прочностных соотношений, имеющих место для ленточной ремённой передачи и кругового кольца с одинаковыми геометрическими размерами, а также прочностными характеристиками, получены одинаковые вероятностные модели и для оценки механической надёжности ленточной передачи. Это существенно упрощает расчёты надёжности передачи ленточной конструкции, в том числе и ленточной передачи для СК, что особенно важно на первоначальном этапе проектирования механической передачи такого класса.

Несмотря на определённые допущения, влияние разброса размеров в пределах допусков может оказаться заметным. Например, в особенно часто встречающихся случаях эксплуатации таких систем принятые числовые значения параметров  $v_{\text{спр}} = 1$ ,  $v_b = 0,1$ ,  $v_h = 0,001$ ,  $v_r = 0,1$  дают значение вариации надёжности

$$v_R = \sqrt{1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 4 \cdot 0,01^2} = 1,009.$$

Это означает, что при внешнем радиусе шкива ленточной передачи  $r = 1$  м его среднее квадратичное отклонение  $\Delta r_0 = 0,1$  м, что существенно при создании высокомоментных передач.

При этом вероятность неразрушения такой системы определяется через коэффициент запаса несущей способности ленточной передачи  $K_3$ , который зависит от отношения  $\bar{R}/\bar{F}_{\text{max}}$ , где  $\bar{F}_{\text{max}}$  — максимальное усилие, действующее на внешнюю поверхность ленты.

В итоге вероятность неразрушения ленточной конструкции передачи будет определяться по формуле [6]

$$P = 0,5 + \Phi(\gamma_g), \quad (10)$$

где  $\Phi(\gamma_g)$  — нормализованная функция Лапласа;  $\gamma_g$  — гауссовский уровень надёжности, который определяется как [7]  $\gamma_g = \frac{K_3 - 1}{\sqrt{K_3^2 v_R^2 + v_S^2}}$ ,  $v_S$  — коэффициент вариации нагрузки [8].

**Примеры решения практических задач.** Согласно ГОСТам для расчётной оценки надёжности ленты рекомендуется применять значение коэффициента вариации несущей способности  $v_R$ , равное 0,15, полученное в результате исследования статистических данных разрушающих испытаний различных конструкций гибких механических передач [9]. Из формулы (10) следует, что требования к надёжности проектируемой передачи будут учтены в коэффициенте запаса несущей способности ленты  $K_3$ . Отсюда следует, что несущая способность, отвечающая требованиям надёжности, должна удовлетворять условию  $R > K_3 S_{\text{max}}$ , где  $S_{\text{max}}$  — максимальное значение нагрузки на ленту. В этом случае расчётная механическая надёжность должна удовлетворять условию  $P_p \geq P_0$ , где  $P_p$  — расчётное значение механической надёжности.

Предлагаемая в данной статье методика позволяет проектировать ленточный привод СК с учётом требований по надёжности и провести расчётную оценку его механической надёжности [6—10].

Рассмотрим конкретный пример расчёта надёжности ленточной передачи по представленным в данной статье формулам. При коэффициенте вариации нагрузки  $v_S = 0,2$  коэффициент вариации несущей способности  $v_R = 0,15$ , при коэффициенте запаса несущей способности ленты  $K_3 = 2,2$  функция Лапласа  $\Phi(\gamma_g) = 0,499$ . В этом случае вероятность неразрушения ленточной конструкции, а следовательно привода СК, будет равна  $P_p = 0,999$ , что вполне удовлетворяет требованиям к надёжности ремённой передачи станка-качалки при добыче нефти.

#### Библиографические ссылки

1. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М.: Машиностроение, 1987. 315 с.
2. Пономарев С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 325 с.
3. Янгиров И.Ф. Модель электромеханического преобразователя со спиральным элементом // Машиностроитель. 2012. № 4. С. 6—9.
4. Янгиров И.Ф. Оценка механической надёжности спиральной конструкции электромеханического

вибрационного преобразователя // Техника машиностроения. 2003. № 2. С. 22—24.

5. **Тихонов А.И.** Показатели качества датчиков механических параметров // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Пензенский политехн. ин-т. Пенза, 1985. № 1. С. 134—138.

6. **Янгиров И.Ф.** Оценка механической надёжности спиральных конструкций электромеханических элементов систем управления // Приборы и системы. 1998. № 4. С. 53—54.

7. **Иориш Ю.И.** Виброметрия: Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. М.: Машгиз, 1963. 771 с.

8. **Ясовеев В.Х.** Исследование и разработка преобразователей линейных перемещений для топливо-

зирующих систем: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1984. 278 с.

9. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / под общ. ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1984. 831 с.

10. **Хайруллин И.Х.** Магнитоэлектрический преобразователь // Машиностроитель. 1995. № 3. С. 31—38.

#### Ссылка для цитирования

**Янгиров И.Ф., Халиков А.Р., Сафиуллин Р.А.** Оценка механической надёжности клиноремённой передачи двигателя станка-качалки для добычи нефти // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 160—163.

УДК 628.9

**А.А. Горбунов**, канд. техн. наук, доц., **А.А. Калабкин**  
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),  
**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, проф.  
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit

## СВЕТОДИОДНЫЙ СВЕТИЛЬНИК ДЛЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ

*Показана целесообразность использования низковольтных светодиодных светильников для устройства системы освещения в помещении с низковольтными сетями или для уличного освещения. Рассмотрены их особенности, преимущества, экономическая эффективность и безопасность в особых условиях эксплуатации. Приведены основные этапы 3D-моделирования при создании таких светильников.*

**Ключевые слова:** светодиодный светильник для низковольтных сетей; «Компас-3D»; кривая силы света (КСС) светового прибора.

*The expediency of using low-voltage LED luminaires for arranging a lighting system in a apartment with low-voltage networks or for street lighting is shown. Their features, advantages, economic efficiency and safety in special operating conditions are considered. The main stages of 3D-modeling when creating such lamps are given.*

**Keywords:** LED lamp for low-voltage networks; Compass-3D; KSS of the lighting device.

Для устройства системы освещения в помещении с низковольтными сетями или для уличного освещения необходимо использовать низковольтные светильники. Конструкция светодиодных (LED) светильников для низковольтных сетей не отличается от конструкции обычных светильников.

На современном рынке светильников особое место принадлежит LED-светильникам для низковольтных сетей, пользующимся наибольшим спросом среди потребителей [1—6].

Современные светодиодные светильники, предназначенные для низковольтных сетей, применяют для организации качественного

освещения в особых эксплуатационных условиях: при повышенном уровне влажности, риске поражения током, высокой вероятности возникновения взрыва для аварийного освещения. Светодиодные светильники могут работать в электрических сетях как переменного, так и постоянного тока. Особо важным преимуществом таких осветительных приборов является их безопасность. Следует отметить также экономию потребляемой электроэнергии при использовании светильников со светодиодным модулем в низковольтных сетях [7—9].

В общем конструкции светодиодного светильника и светильника с лампами накали-

вания идентичны. Однако LED-светильники сложнее. LED-светильник состоит из одного или нескольких светодиодов, которые могут различаться по мощности, цвету свечения, размерам. Возможно различное число диодов в матрице, припаиваемых к алюминиевой или текстолитовой плате разных размеров и форм. Соединение групп происходит последовательно. В целях преобразования сетевого напряжения в требуемое для работы светодиодов применяется драйвер. В большинстве случаев используется трансформаторный драйвер. Различают два типа трансформаторных драйверов: открытый и закрытый, встраиваемый в корпус лампы. В связи с тем, что светодиодные лампы пришли на смену лампам накаливания, многие из них имеют цоколь необходимого диаметра, выполненный из латуни с никелевым покрытием, при этом основание цоколя выполнено из полиэтилентерефталата. Изготовление корпуса осуществляется из пластика или стекла, в котором отсутствуют вредные пары ртути и газы. Для предотвращения перегрева светильник может быть оснащён радиатором, снижающим негативное влияние температуры [10].

При подключении светодиодных светильников можно использовать электронный драйвер, способный преобразовывать переменное напряжение 220 В в требуемое постоянное низковольтное напряжение с заданной мощностью. Однако достаточно высокая стоимость такого оборудования послужила причиной изготовления альтернативных недорогих, простых в изготовлении и ремонте источников питания на базе трансформаторов, способных преобразовывать переменное напряжение 220 В в требуемое постоянное низковольтное. Наряду с этим необходимо использовать сглаживающие конденсаторы, обеспечивающие отсутствие пульсации напряжения после диодного моста.

Светодиодные светильники, применяемые в низковольтных сетях, имеют ряд преимуществ, к которым можно отнести не только экономичность их использования, но и безопасность: корпус и электрические схемы LED-приборов герметичнее, чем у классических светильников со сменными лампами, особо высокая защита от искрения способствует снижению риска поражения электрическим током; долговечность: приборы, оснащённые светодиодами, можно использовать в несколько раз дольше, чем традиционные (с газоразрядными

лампами), при этом срок их эксплуатации может превышать 100 000 ч; экологичность: характерной особенностью LED-светильников является отсутствие в их конструкции ртути, галогенных соединений и других опасных веществ; простоту эксплуатации: в течение гарантийного периода светильники не требуют ремонта и технического обслуживания, утилизация по окончании срока эксплуатации осуществляется в обычном порядке; универсальное питание: возможность подключения светодиодных светильников к стационарным электросетям и к альтернативным источникам питания — ветряным генераторам, аккумуляторным и солнечным батареям [10].

Для сравнительной оценки эффективности применения светильников со светодиодным модулем для низковольтных сетей (табл. 1) необходимо отметить, что при световом потоке, равном 900 лм, потребляемая LED-светильниками мощность электроэнергии составляет от 10 до 12 Вт, что ниже мощности, потребляемой люминесцентной лампой, в среднем в два раза, лампой накаливания — в семь раз [10]. Сравнивая осветительные приборы с указанной мощностью, следует отметить низкий нагрев светодиодной лампы для низковольтных сетей, её прочную конструкцию, простоту установки, экологичность применения и длительный срок службы.

В дополнение к перечисленным выше преимуществам экономически выгоднее исполь-

Таблица 1

**Мощности электроэнергии, потребляемой светильниками с лампами накаливания (ЛН), люминесцентными (ЛЛ) и LED-лампами для низковольтных сетей, обеспечивающие требуемые значения светового потока**

Световой поток, лм	Мощность, Вт		
	ЛН	ЛЛ	LED-лампа
250	20	5...7	2...3
400	40	10...13	4...5
700	60	15...16	6...10
900	75	18...20	10...12
1200	100	25...30	12...15
1800	150	40...50	18...20
2500	200	60...80	25...30

Таблица 2

**Параметры светильников со светодиодными лампами для низковольтных сетей и с лампами накаливания**

Параметр	Лампа накаливания	Светодиодная лампа
Число ламп в светильнике	10	10
Мощность лампы, Вт	75	10
Мощность всех используемых ламп, Вт	750	100
Общее время работы в день, ч	7	7
Общее время работы в год, ч	2555	2555
Общее потребление электроэнергии в день, кВт	5,250	0,700
Общее потребление электроэнергии в год, кВт	1916	256
Затраты на электроэнергию за 1 год (2,6 руб./кВт), руб.	4982	664
Затраты, связанные с покупкой ламп (10 шт.), руб.	120	1470
Срок службы лампы, ч	1000	30 000
Затраты, связанные с приобретением и заменой перегоревших за 1 год ламп, руб.	120	0
Общие затраты за 1 год, руб.	5222	2134
Затраты, связанные с приобретением и заменой перегоревших ламп за 5 лет	1533	0
Общие затраты за 5 лет, руб.	27 644	10 672

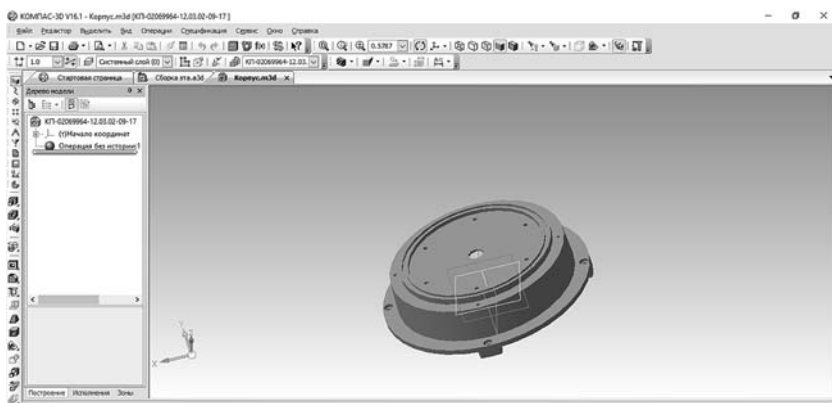
Примечание. При определении затрат использованы цены и тарифы, действующие во время проведения исследований.

зовать светильники (с напряжением сети 36 В) со светодиодным модулем, чем с лампами накаливания (табл. 2).

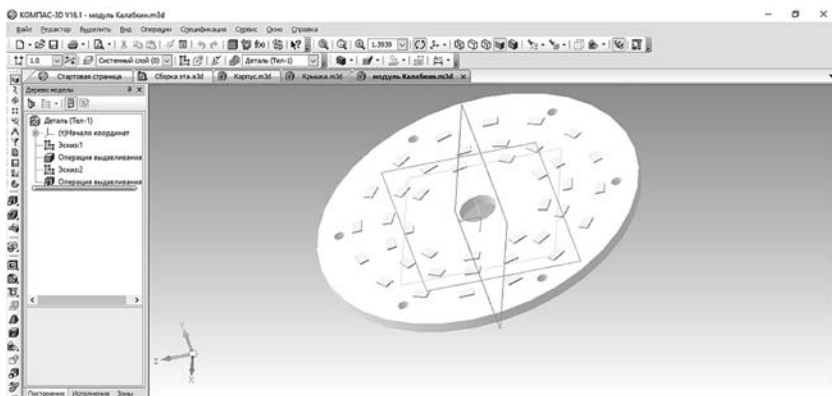
Приведённые в табл. 2 данные свидетельствуют об экономической эффективности применения светодиодных ламп для низковольтных сетей в сравнении с лампами накаливания. Экономическая выгода LED-светильников при использовании в течение 5 лет составит 16 972 руб. При этом следует отметить необходимость и целесообразность организации использования светильников со светодиодным модулем в особых эксплуатационных условиях.

На базе Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва и МИРЭА—РТУ проведены исследования по созданию светодиодного светильника для низковольтных сетей. При моделировании светильника использована система «Компас-3D», предназначенная для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей (в том числе деталей, формируемых из листового материала путём его гибки) и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе спроектированного ранее прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

При создании 3D-модели разрабатываемого светильника за основу был взят корпус светильника Varton. Создавались 3D-модели корпуса (рис. 1) и светодиодной платы светильника (рис. 2). Затем в программе «Компас-3D» моделировалось защитное стекло разрабатываемого светильника (рис. 3).



**Рис. 1. 3D-модель корпуса разрабатываемого светильника**



**Рис. 2. 3D-модель светодиодной платы разрабатываемого светильника**

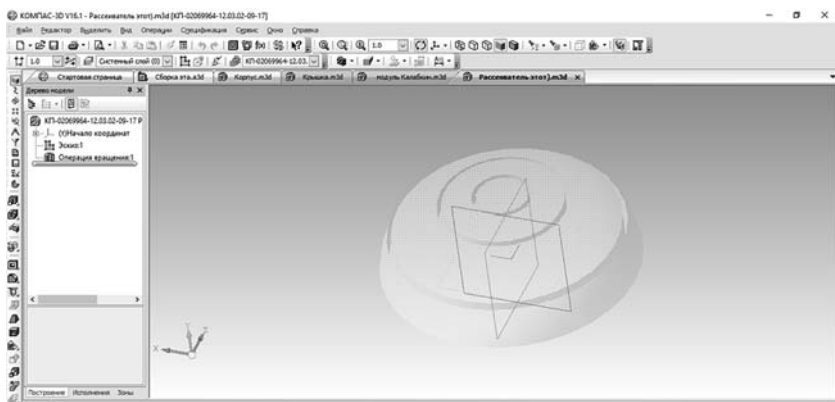


Рис. 3. 3D-модель защитного стекла разрабатываемого светильника

Для определения целесообразности применения светильника были построены кривые силы света (КСС) светового прибора с рассеивателем и без рассеивателя (рис. 4). Полученные КСС являются косинусными. Это говорит о достаточно широком диаметре светового пятна на освещаемой поверхности.

Таким образом, при помощи компьютерной программы «Компас-3D» удалось смоделировать светодиодный светильник для низковольтных сетей на базе светильника Varton.

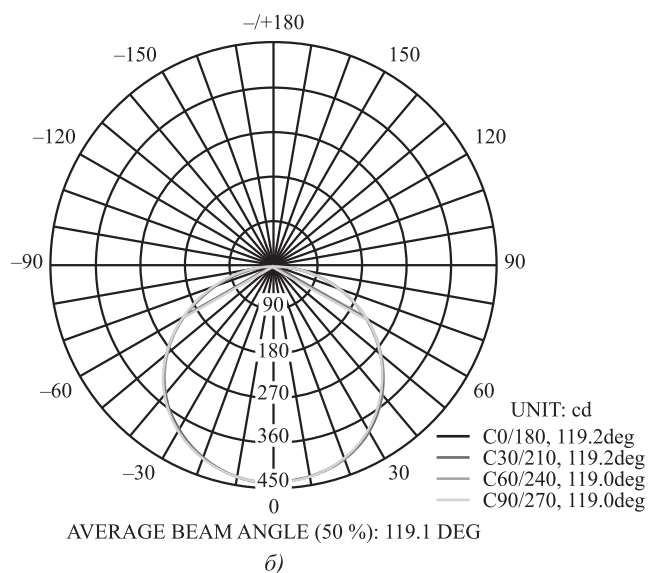
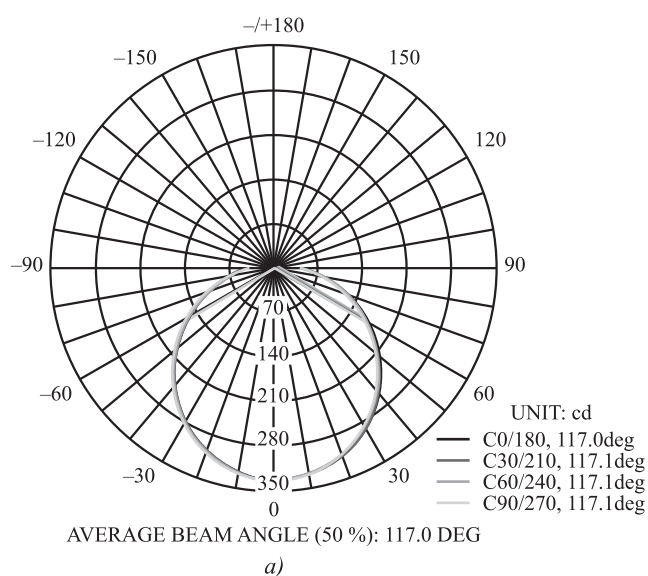


Рис. 4. КСС светодиодного низковольтного светового прибора с рассеивателем (а) и без рассеивателя (б)

### Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.
2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 136 с.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. 186 с.
4. **Микаева С.А., Брысин А.Н.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.
5. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.
6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы. М.: Русайнс, 2020. 172 с.
7. **Светодиодные** светильники для низковольтных сетей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://revolution.allbest.ru> (дата обращения: 30.09.2020).
8. **Сысоева Е.А.** Экономическая эффективность использования светодиодных ламп // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Инновационное развитие. 2012. № 3 (21). С. 119—123.
9. **Сарычев Г.С.** Пути и проблемы модернизации отечественной светотехники // Полупроводниковая светотехника. 2011. № 1. С. 75—79.
10. **Индустрия** света [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.disprom.ru> (дата обращения: 30.09.2020).

### Ссылка для цитирования

**Горбунов А.А., Калабкин А.А., Микаева С.А.** Светодиодный светильник для низковольтных сетей // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 163—166.



УДК 681.5:683.3

**К.А. Пупков**, д-р техн. наук, проф., **Ю.К. Броварская**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)  
brovarkayayuk@student.bmstu.ru

## ДИНАМИЧЕСКИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*Исследованы динамические и информационные свойства интеллектуальных систем. Установлена взаимосвязь между качеством управления и устойчивостью в таких системах. Разработан метод и проведено исследование зависимости качества управления и затрат времени человека-оператора на оценку тестового изображения. Исследовано влияние времени чистого запаздывания на запас устойчивости и качество переходного процесса. Показано, что в интеллектуальных системах, работающих во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, затраты времени (латентный период) на реализацию форм процесса познания влияют на качество управления и устойчивость системы. Определено время чистого запаздывания. Приведены результаты исследований. Введён новый показатель информационных свойств интеллектуальных систем — качество управления.*

**Ключевые слова:** интеллектуальная система; человек-оператор; латентный период; форма познания; качество управления.

*The dynamic and informational properties of intelligent systems are investigated. The relationship between the quality of management and sustainability in such systems is established. A method is developed and a study of the influence of the control quality and the time spent by a human operator on the evaluation of the test image is carried out. The influence of the pure delay time on the stability margin and the quality of the transient process is investigated. It is shown that in intelligent systems working in conjunction with a person (a group of people) or autonomously, the time spent (latency period) on the implementation of the cognition process forms affects the quality of control and stability of the system. The time of pure delay is determined. The research results are presented. A new indicator of information properties for intelligent systems is introduced — the quality of control.*

**Keywords:** intelligent systems; human operator; latency period; form of cognition; quality of management.

**Введение.** В классической теории управления автоматическая система представляет собой объединённую информационным процессом совокупность объектов и системы управления, обладающую устойчивым и целенаправленным действием. Цель для такой системы задаётся в виде той или иной программы, уставок.

В качестве показателей эффективности систем используются запас устойчивости, качество переходного процесса, статическая и динамическая точность, которые характеризуют динамику системы.

Развитие информационных технологий, микроэлектроники и биотехнологий дают возможность перехода к разработке и созданию нового поколения системы обработки информации и управления — интеллектуальных систем [1–6].

Под интеллектуальной системой понимается объединённая информационным про-

цессом совокупность технических средств и программного обеспечения, работающих во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, способная на основе сведений и знаний при наличии мотивации синтезировать цель, принимать решение к действию и находить рациональный способ достижения цели. Отличие таких систем от классических автоматических систем заключается в том, что синтез цели и принятие решений осуществляются внутри системы [1, 7]. Если цель задана априори и присутствуют другие атрибуты интеллектуальных систем [8, 9], то такие системы называются системами с интеллектуальными компонентами [10–12].

В интеллектуальных системах, работающих во взаимосвязи с человеком (коллективом людей) или автономно, возникают проблемы определения затрат времени на реализацию форм процесса познания, включая принятие реше-

ния в латентном периоде прохождения информации через мозг человека [7]. Время латентного периода оказывает влияние на качество принимаемого решения и, соответственно, на качество управления и устойчивость системы. Чем больше данное время, тем качественней будет управление (вероятность правильного достижения цели). Но для систем также важна и устойчивость — динамический показатель: чем дольше человек принимает решение, тем меньше устойчивость всей системы. Таким образом, наряду с существующими динамическими показателями запаса устойчивости, введём понятие, характеризующее информационные свойства — «качество управления» [2, 13].

Качество управления — показатель информационной эффективности интеллектуальных систем, определяющий вероятность достижения цели.

В работе исследованы динамические и информационные свойства интеллектуальных систем. Установлена взаимосвязь между качеством управления и устойчивостью в интеллектуальных системах.

**Система тестов для оценки качества управления.** Для оценки качества управления была разработана система тестов, с помощью которой можно оценить как интервал времени «чистого» запаздывания, так и правильность принятого человеком решения. Тесты представляют собой набор изображений, используемых в медицине для исследования цветового зрения и диагностики различных цветовых патологий. Следует обратить внимание на то, что данное тестирование проводилось со здоровыми людьми, не имеющими никаких отклонений в восприятии цвета.

Система тестов разработана на языке программирования Python 3 с помощью Qt Designer (кроссплатформенная свободная среда для разработки графических интерфейсов (GUI) программ, использующих библиотеку Qt).

Интерфейс программы показан на рис. 1 и 2.

По завершении теста программа записывает результаты его выполнения в файл, в котором содержится следующая информация: дата и время начала эксперимента, верно ли человек-оператор распознал изображение, время распознавания.

**Определение зависимости между качеством управления и временем чистого запаздывания человека-оператора.** Вопросы в системе тестов были расположены в порядке возрастания сложности, однако это субъективно. Также следует учитывать и тот факт, что тест должен про-

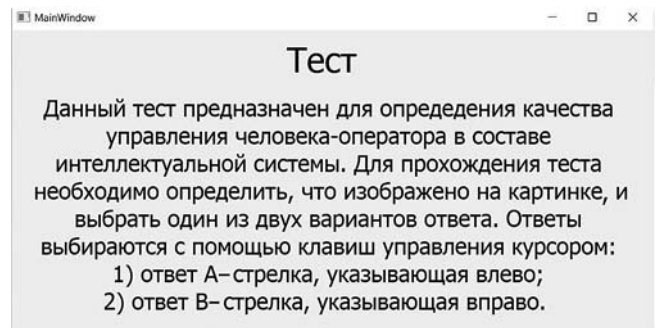


Рис. 1. Стартовая страница теста

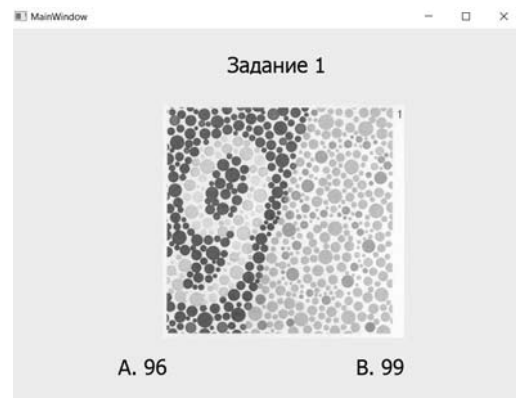


Рис. 2. Пример одного из заданий теста

ходить хорошо обученный человек, привыкший к интерфейсу программы и понимающий суть задания. Экспериментально находим среднее значение времени по каждому заданию [15, 16]. В ходе эксперимента выявлена зависимость между качеством управления и временем чистого запаздывания человека-оператора.

На рис. 3 показано информационное качество для первоначальной последовательности

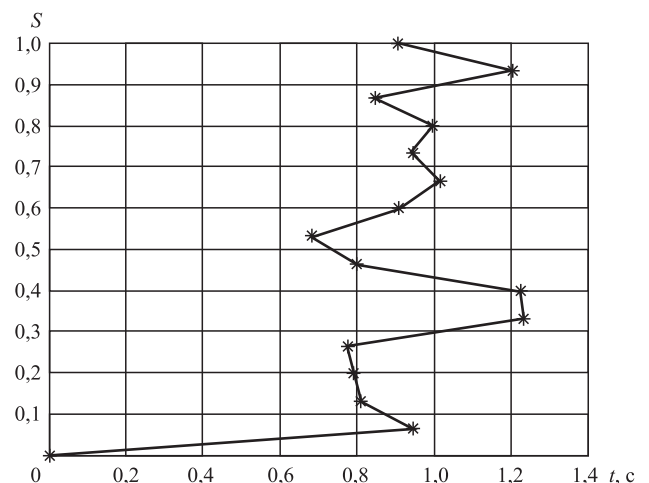


Рис. 3. Информационное качество при первоначальном расположении заданий:

$S$  — некоторая безразмерная величина, характеризующая сложность задания



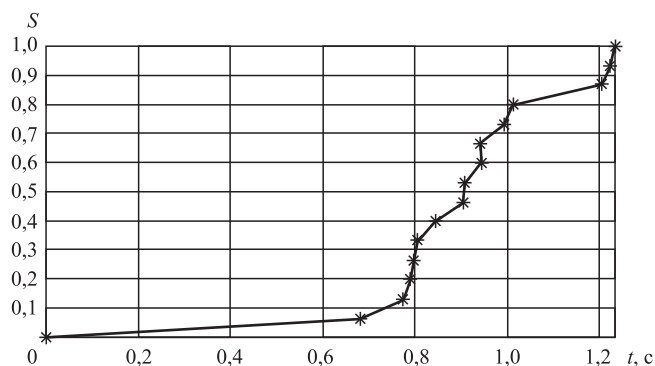


Рис. 4. Информационное качество отсортированной последовательности

тестов на распознавание. С помощью данной зависимости можно примерно оценить сложность картинок и отсортировать их в порядке возрастания.

На рис. 4 приведена отсортированная последовательность по возрастанию времени, которое человек тратит на распознавание изображения.

**Исследование влияния времени запаздывания человека-оператора на динамику системы.** Для этого используем передаточную функцию вида

$$W_{\text{чо}}(s) = \frac{K_n e^{-\tau_n s} (\tau_1 s + 1)}{T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_n = 0,30$ ;  $\tau_1 = 0,28$  с;  $T_1 = 0,22$  с;  $\xi_1 = 0,6$  — средние значения параметров для нескольких операторов [2].

Передаточная функция привода имеет вид

$$W_{\text{рп}}(s) = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (2)$$

где  $T = 0,01$  с.

Передаточная функция снаряда может быть представлена в виде

$$W_{\text{сн}}(s) = \frac{K_{\text{сн}}(T_3 s + 1)}{T_{\text{сн}}^2 s^2 + 2\xi_{\text{сн}} T_{\text{сн}} s + 1}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{сн}} = 3,5$ ;  $T_3 = 0,05$  с;  $T_{\text{сн}} = 0,17$  с;  $\xi_{\text{сн}} = 0,4$ .

Изменение тангажа обычно представляют в виде [17]:

$$W_{\text{в}}(s) = \frac{1}{s}. \quad (4)$$

Рассмотрим влияние  $\tau_n$  — времени запаздывания человека-оператора, характеризующего формирование ответной реакции пилота, на входной сигнал  $x(t)$  (рис. 5 и 6).

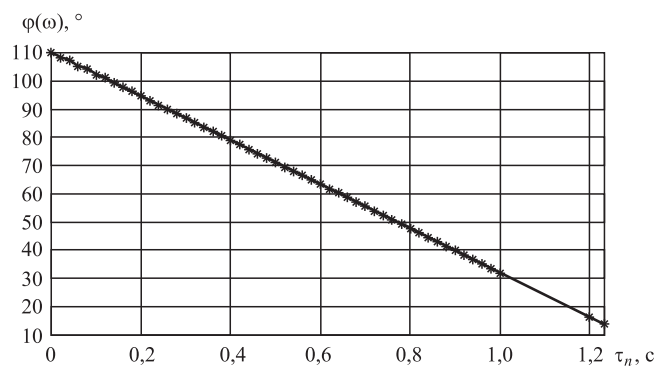


Рис. 5. Зависимость запаса устойчивости по фазе от времени запаздывания  $\tau_n$

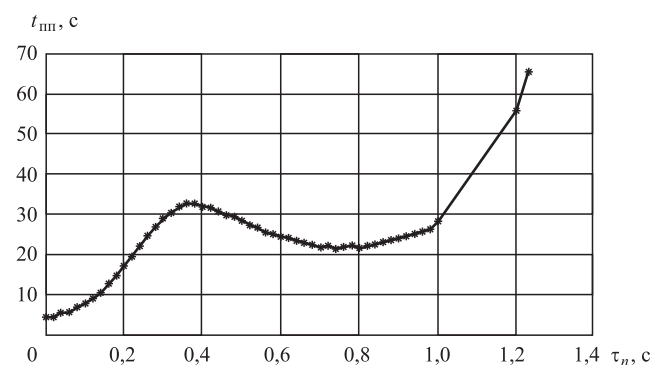


Рис. 6. Зависимость времени переходного процесса от времени запаздывания  $\tau_n$

Время переходного процесса прямо пропорционально времени запаздывания, а запас устойчивости обратно пропорционален времени запаздывания. При данных значениях параметров передаточной функции человека-оператора система имеет достаточный запас устойчивости. В целом для управления таким объектом значения времени запаздывания могут изменяться в широком диапазоне, но не следует забывать, что запаздывание отрицательно влияет на устойчивость и время переходного процесса, поэтому данный диапазон примем оптимальным.

**Взаимосвязь качества управления и устойчивости в интеллектуальных системах.** Анализируя результаты тестирования, получаем зависимость качества управления от времени «чистого» запаздывания. Затем получаем зависимость запаса устойчивости от времени запаздывания для системы управления угловой скоростью тангажа с заданными характеристиками объекта управления. Данные зависимости позволяют установить взаимосвязь качества управления и устойчивости в интеллектуальных системах. С точки зрения устойчивости системы величину запаздывания человека-оператора целесообразно уменьшать, но это приводит к ухудшению качества принимаемого решения,

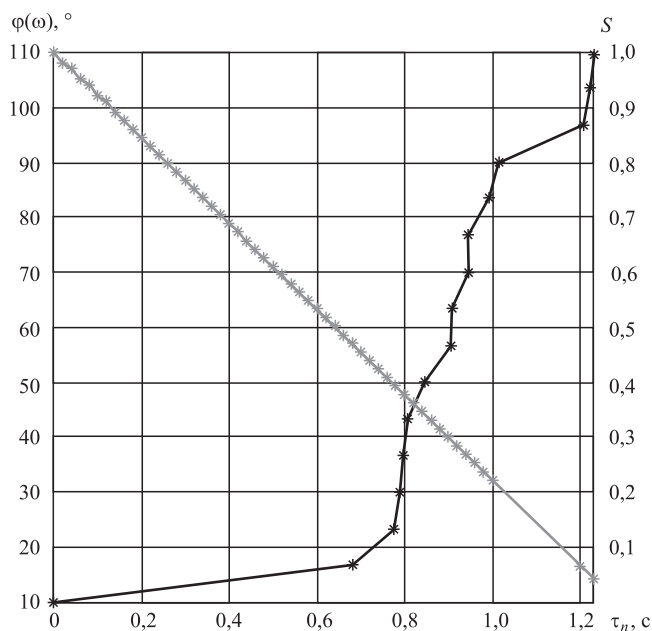


Рис. 7. Взаимосвязь качества управления и устойчивости в интеллектуальных системах

а следовательно, и качества управления [15]. Благодаря установленной взаимосвязи становится возможным определение некоторого желаемого значения времени чистого запаздывания, которое будет удовлетворять с точки зрения как динамических, так и информационных свойств интеллектуальной системы.

На рис. 7 показана установленная взаимосвязь. Видно, что оси времени для двух графиков не совпадают. Это связано с тем, что зависимость запаса устойчивости по фазе от времени запаздывания была получена для математической модели, а время запаздывания человека изменялось от 0 до 0,5 с. Тестированию подвергались хорошо обученные люди, но не профессиональные пилоты, т. е. полученные экспериментально данные не идеальны.

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработан метод определения зависимости качества управления и затрат времени на оценку теста. Исследовано влияние «чистого запаздывания» на запас устойчивости и качество переходного процесса. Установлена величина — некоторое желаемое значение времени чистого запаздывания в интеллектуальных системах.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-08-00303.*

#### Библиографические ссылки

1. Пупков К.А., Коньков В.Г. Интеллектуальные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 348 с.

2. Пупков К.А., Левадко А.Д., Лукьянова Н.В., Новикова В.А., Нэй Зин Хтун, Полякова А.А., Садовников А.Е., Трифонов О.П., Устюжанин А.Д. Динамический стенд для оценки затрат времени на формы мышления человека-оператора // Инженерный журнал. 2019. № 9. 8 с.

3. Pupkov K.A. Intelligent systems and Human Being // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 150. P. 540—543.

4. Васильев С.Н. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит, 2000. 352 с.

5. Ke Fang, Neusipin K.A. Algorithms in intelligent control systems of aircrafts. Cina, Chengdu: Sichuan university press, 2011. P. 162.

6. Neusipin K.A., Ke Fang. Research Progress of Intelligent Control Systems of Aircrafts // Acta Armamentarii. 2010. Vol. 31. No. 7. P. 17—24.

7. Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р. Системы человек — машина. М.: Машиностроение, 1980. 399 с.

8. Макарова И.М., Лохина В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления: М.: Физматлит, 2001.

9. Неусыпин К.А., Логинова И.В. Вопросы теории и реализации интеллектуальных систем. М.: Сигнал МПУ, 1999. 220 с.

10. Неусыпин К.А., Селезнева М.С. Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.

11. Селезнева М.С. Применение интеллектуальных технологий при проектировании систем управления и измерительных комплексов // Технические науки — от теории к практике. 2016. № 58—1. С. 93—98.

12. Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.

13. Шэнь Кай, Неусыпин К.А. Исследование критериев степени наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 723—731.

14. Неусыпин К.А. Направления развития интеллектуальных систем // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 12. С. 23—30.

15. Лукьянова Н.В. Модульный метод моделирования с использованием разложения Винера // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 17—22.

16. Лукьянова Н.В., Мешков Н.А., Колупаев Р.В. Исследование систем управления: идентификация, моделирование, прогнозирование: учеб. пособ. / под общ. ред. К.А. Неусыпина. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 110 с.

17. Неусыпин К.А., Кэ Ф., Дзя Л.С. Управление и наведение ракет, основанное на теории дифференциальной геометрии // Автоматизация. Современные технологии. 2012. № 1. С. 16—20.

#### Ссылка для цитирования

Пупков К.А., Броварская Ю.К. Динамические и информационные свойства интеллектуальных систем управления // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 167—170.

УДК 004.09

Л.А. Зинченко, д-р техн. наук, проф., В.В. Казаков, А.А. Миронов  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

lzinchenko@bmstu.ru

## ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ДЕСКРИПТОР ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О МНОГОСЛОЙНЫХ РАДИАЦИОННО СТОЙКИХ ЭКРАНАХ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Рассмотрен подход к когнитивной визуализации свойств многослойных защитных экранов, используемых при экранировании электронной аппаратуры при спецвоздействиях. Предложен иерархический подход к отображению информации об уровне защиты при анализе альтернативных проектных решений защитных экранов. Описано применение предложенного иерархического дескриптора в пользовательском интерфейсе системы автоматизированного расчёта и визуального анализа альтернативных проектных решений многослойных защитных экранов.*

**Ключевые слова:** иерархический дескриптор; многослойные материалы; визуализация; радиационная стойкость; когнитивные технологии; радиационно стойкие защитные экраны.

*An approach to the properties cognitive visualization of multilayer protective screens used in the screening of electronic equipment under special impacts is considered. A hierarchical approach to displaying information about the protection level at the analysis of alternative design solutions for protective screens is proposed. The application of the proposed hierarchical descriptor in the user interface of the automated calculation system and visual analysis of alternative design solutions for multilayer protective screens is described.*

**Keywords:** hierarchical descriptor; multilayer materials; visualization; radiation resistance; cognitive technologies; radiation resistant protective screens.

**Введение.** При разработке электронной аппаратуры для применения в космических миссиях необходимо обеспечить защиту оборудования от тяжёлых заряженных частиц [1]. При использовании электронной аппаратуры в космических приложениях самым опасным участком при выводе в заданную точку являются пояса Ван-Аллена [2]. Тяжёлые заряженные частицы в этих поясах могут достигать энергии порядка 100 мэВ [3]. Такой энергии достаточно для воздействия на материалы микросхемы, что может привести к перебоям в корректной работе аппаратуры, изменению данных, хранящихся в модулях памяти, а также к полному выходу аппаратуры из строя.

Для защиты электронной аппаратуры используются различные методы [3]. Одним из самых распространённых является метод схмотехнической защиты. Микросхемы разрабатываются таким образом, чтобы максимально эффективно работать в условиях радиационной нагрузки. Другим методом является защита на уровне программного обеспечения, которое разрабатывается с учётом возможных сбоев в работе или передаче информации, в частности, используются корректировочные

коды для проверки точности доставляемых данных между модулями и т. п.

Ещё одним эффективным методом является экранирование всего устройства или же чувствительных к внешним воздействиям его составляющих. Наилучшим вариантом экранирования является конфигурация защитного экрана не более чем с тремя слоями из различных материалов. Такой подход позволяет добиться лучших характеристик стойкости и массогабаритных свойств защитного экрана, что крайне важно при использовании в космических приложениях.

Когнитивно-графическое отображение информации [4, 5] является способом представления данных, учитывающим не только специфику отражаемых данных, но и восприятие их человеком в процессе обработки информации. Работая со сложными структурами данных, включающими в себя множество параметров и взаимосвязей между ними, проектировщику бывает сложно воспринимать информацию, делать выводы и принимать решения на основании множества изменяющихся параметров. В статье предложен подход к представлению информации о характери-

стиках защитных экранов на основе иерархического дескриптора.

**Иерархический дескриптор многослойных защитных экранов.** В предлагаемом подходе для упрощения анализа параметров многослойных защитных экранов все параметры разделяются на 3 уровня иерархии: уровень многослойного экрана, уровень материалов и уровень химических элементов.

На рис. 1 представлена предлагаемая иерархия параметров и характеристик многослойных защитных экранов, а на рис. 2 приведена предлагаемая декомпозиция описания многослойного экрана.



Рис. 1. Визуальное представление уровней отображения информации о многослойных защитных экранах

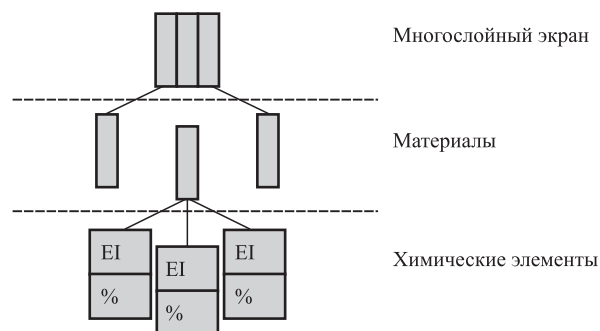


Рис. 2. Декомпозиция структурных составляющих многослойного защитного экрана

В предлагаемом подходе параметр понимается как базовая структурная единица информации, описывающая тот или иной объект и его свойства. Такой информацией может выступать как текстовое описание, так и числовая характеристика, например, плотность или атомный номер.

Уровень «Химические элементы» является базовым уровнем иерархии. Он описывает химические элементы, из которых состоят материалы. В табл. 1 приведены параметры, относящиеся к уровню химических элементов, которые выбраны для анализа многослойных защитных экранов.

Уровень «Материалы и сплавы» является следующим уровнем иерархии. Он описывает используемые комбинации химических элементов. В табл. 2 представлен перечень выбранных параметров уровня «Материалы и сплавы».

Таблица 1

#### Перечень выбранных параметров химических элементов

Параметр	Описание	Тип
Плотность	Плотность химического элемента	Числовой параметр, кг/м <sup>3</sup>
Символ	Краткое буквенное обозначение химического элемента	Текстовый параметр
Название	Детальное описание химического элемента	Текстовый параметр
Атомный вес	Атомный вес химического элемента	Числовой параметр
Атомный номер	Атомный номер химического элемента	Целочисленный параметр
Вес	Вес материала на 1 м <sup>3</sup>	Числовой параметр
Цена	Средняя цена материала за 1 м <sup>3</sup>	Числовой параметр
Распространённость	Качественный трёхуровневый относительный показатель, отражающий характер распространённости химического элемента в природе	Текстовый параметр (хорошо, средне, плохо)
Тип агрегатного состояния	Тип агрегатного состояния химического элемента	Числовой параметр, семантически связанный с агрегатными состояниями
Процент содержания	Процент содержания химических элементов в материале если материал является составным (сплав и т. д.)	Числовой параметр

Таблица 2

**Перечень выбранных параметров материалов**

Параметр	Описание	Тип
Удельный вес	Вес 1 м <sup>3</sup> материала (слоя защитного экрана)	Числовой параметр
Общий вес	Общий вес слоя	Числовой параметр
Количество химических элементов	Количество химических элементов, входящих в состав материала (слоя защитного экрана)	Целочисленный параметр
Цена	Общая цена производства 1 м <sup>3</sup> материала (слоя защитного экрана)	Числовой параметр
Описание	Детальное описание материала (слоя защитного экрана)	Текстовый параметр
Название	Короткое название материала (слоя защитного экрана)	Текстовый параметр
Толщина	Толщина слоя (слоя защитного экрана)	Числовой параметр

Таблица 3

**Перечень выбранных параметров многослойных экранов**

Параметр	Описание	Тип
Количество слоёв	Параметр, показывающий количество слоёв в данном экране	Целочисленный параметр
Цена	Цена производства данного экрана (1 м <sup>2</sup> )	Числовой параметр
Вес	Вес экрана площадью 1 м <sup>2</sup> (толщина экрана задана параметрами его составных элементов — слоёв)	Числовой параметр
Толщина	Общая толщина многослойного экрана, мм	Числовой параметр
Толщина слоёв	Толщина каждого слоя, входящего в состав многослойного экрана, мм	Массив числовых параметров, размер массива равен параметру количества слоёв
Радиационная стойкость	Качественный показатель, определяющий, насколько хорошо многослойный экран защищает от тяжёлых заряженных частиц	Качественный трёхуровневый относительный показатель (хорошо, средне, плохо)
Глубина проникновения ионов	Средняя глубина проникновения тяжёлых заряженных частиц в многослойных экранах, мм	Числовой показатель

Уровень «Многослойный экран» является высшим уровнем иерархии. Он описывает используемые комбинации материалов. В табл. 3 представлен перечень выбранных параметров уровня «Многослойный экран». Основными параметрами на этом уровне являются параметр глубины проникновения ионов и параметр, характеризующий качество объекта исследования.

Для связи между различными уровнями иерархии используются параметры, позволяющие установить взаимосвязь между различными уровнями иерархии. Например, в табл. 1 процент содержания не связан напрямую с химическим элементом и не описывает его свойства или характеристики, но является связующим параметром со следующим уровнем иерархической структуры, а именно уров-

нем «Материалы и сплавы». Уровень «Материалы и сплавы» включает в себя также характеристики, относящиеся не только к самим материалам, но и к слоям защитного экрана. Для связи с уровнем «Многослойный экран» введены два параметра: параметр общего веса слоя и параметр толщины слоя. Такие зависимости позволяют выстроить чёткую иерархию и связи в структуре данных отображения информации о защитном экране.

Все выбранные параметры можно представить в виде иерархического дескриптора (рис. 3).

На рис. 4 приведён пример иерархического дескриптора с параметрами на каждом из уровней декомпозиции.

Изначально все параметры защитных экранов хранятся в базе данных, их типиза-

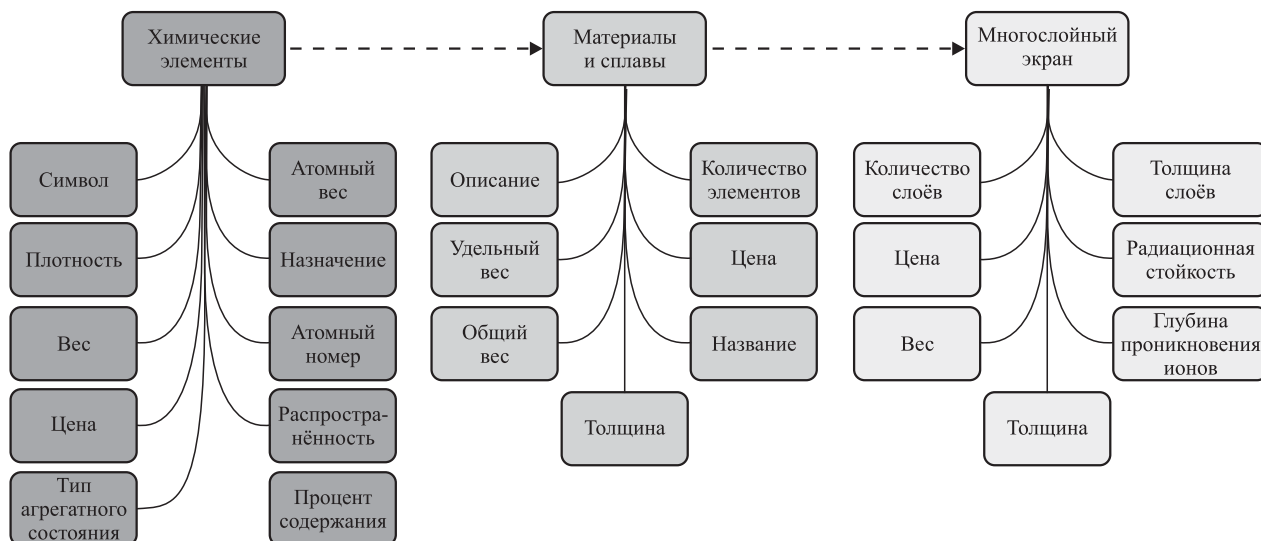


Рис. 3. Иерархический дескриптор отображения информации о многослойных экранах

```

screen:
  averagelonsPenetrationDepth: 0,6 · 10-3 (м)
  ...
  material_1:
    element_1:
      atomicNumber: 22
      atomicWeight: 47,867 (а. е. м.)
      density: 4,54 · 10-3 (кг/м3)
      percent_element_1: 100
    ...
    material_width: 0,2 · 10-3 (м)
  ...
  material_2:
    element_1:
      atomicNumber: 13
      atomicWeight: 26,981 (а. е. м.)
      density: 2,7 · 10-3 (кг/м3)
      percent_element_1: 100 (%)
    ...
    material_width: 0,5 · 10-3 (м)
  ...
  
```

Рис. 4. Пример иерархического дескриптора многослойного защитного экрана

ция зависит от выбранной системы управления базами данных (СУБД) и поддерживаемых ею типов хранимых значений. Сам же дескриптор не имеет ограничений на типы параметров или уровней, что позволяет его использовать с любой СУБД.

При программной реализации иерархического дескриптора была использована СУБД MySQL, однако предлагаемый подход может быть реализован и с использованием других СУБД.

**Когнитивно-графическое отображение иерархического дескриптора защитных экранов.** При решении практически важных задач иерархический дескриптор многослойного радиационно стойкого защитного экрана мо-

жет быть достаточно большим. Как правило, такой объём информации не требуется исследователю всё время взаимодействия с системой визуальной аналитики.

Для снижения когнитивной нагрузки на пользователя необходимо обеспечение возможности работы с дескриптором как с динамическим объектом, который позволяет в любой момент скрыть неиспользуемую информацию. Каждый уровень дескриптора, кроме конкретных параметров, может быть интерактивным. Под интерактивностью понимается сворачивание и разворачивание блоков иерархического дескриптора. Такой подход также снизит нагруженность пространства отображения информации в системе визуальной аналитики, что позволит разместить больше необходимых исследователю данных в конкретный момент, а также повысит его концентрацию на значимой информации.

В результате поиск лучшего альтернативного решения становится эффективнее и проще, что существенно снижает вероятность ошибки при анализе и принятии решения, а также увеличивает время работы пользователя без существенных признаков утомляемости.

**Программная реализация иерархического дескриптора защитных экранов.** Иерархический дескриптор защитного экрана может быть представлен в различных форматах: XML (eXtensible Markup Language), YAML (Yet Another Markup Language) и других схожих с данными форматами представления данных.

Для программной реализации был выбран распространённый формат передачи данных JSON (JavaScript Object Notation) [6]. Данный

формат выбран из соображений его широкой распространённости и простоты работы с различными языками программирования. Зачастую в стандартном наборе многих языков программирования уже заложены функции работы с JSON, сериализация и десериализация данных. Использование JSON позволяет быстро встраивать предложенный иерархический дескриптор в любые программные комплексы без существенных доработок. Также JSON может быть сохранён в текстовом формате, что позволяет сохранять и читать разработанные структуры многослойных экранов.

На рис. 5 приведён пример иерархического дескриптора (см. рис. 4). Для простоты восприятия структуры введены переход на новую строку и табуляция, но это не является обязательным для формата JSON.

Апробация предложенного дескриптора была проведена при реализации системы автоматизированного расчёта и визуальной ана-

```
{
  "screen": {
    "averagelonsPenetrationDepth": 0,0006,
    "material_1": {
      "element_1": {
        "atomicNumber": 22,
        "atomicWeight": 47,867,
        "density": 0,00454,
        "percent_element_1": 100
      },
      "material_width": 0,0002
    },
    "material_2": {
      "element_1": {
        "atomicNumber": 13,
        "atomicWeight": 26,981,
        "density": 0,0027,
        "percent_element_1": 100
      },
      "material_width": 0,0005
    }
  }
}
```

**Рис. 5. Пример иерархического дескриптора многослойного защитного экрана в формате JSON**



**Рис. 6. Программный модуль, реализованный с применением иерархического дескриптора многослойного защитного экрана**

литики параметров многослойных защитных радиационно стойких экранов с когнитивно-графическим отображением информации.

На рис. 6 приведён модуль системы, позволяющий визуально проанализировать свойства многослойного защитного экрана. Слева показан когнитивный образ многослойного экрана, который генерируется специальной функцией системы, принимающей на вход дескриптор многослойного экрана. Сам дескриптор конструируется посредством получения информации о каждом элементе многослойного экрана из связанной с системой базы данных.

После получения всех необходимых данных они преобразуются в соответствующую структуру (см. рис. 4) и передаются с сервера на клиентскую часть в формате JSON непосредственно функции визуализации. Модуль генерации иерархического дескриптора был разработан с использованием языка программирования PHP (Hypertext Preprocessor). Данные для конструирования дескриптора хранятся в системе управления базами данных MySQL. Часть программного кода, отвечающая за получение и обработку иерархического дескриптора базы, разработана с использованием языка программирования JavaScript.

Для удобства анализа многослойных экранов и результатов расчёта их радиационной стойкости в интерфейсе имеется блок визуализации иерархического дескриптора. Пример визуализации представлен в левой части модуля системы (см. рис. 6). Функция, реализующая визуальное интерактивное представление иерархического дескриптора, также принимает на вход дескриптор и генерирует HTML-разметку (HyperText Markup Language). Данная HTML-разметка может быть встроена в любую часть web-интерфейса системы.

Интерактивность данной реализации визуального представления иерархического дескриптора заключается в том, что пользователь может в процессе работы с модулем системы взаимодействовать с визуальным образом, сворачивая и разворачивая различные блоки. Можно провести аналогию между визуальным образом иерархического дескриптора и иерархической структурой папок в операционных системах. Возле каждого объекта, который содержит в себе сложную структуру данных, имеется небольшой серый треугольник, нажав на который можно скрыть внутреннее содержимое объекта или показать его. В данном случае сложной является любая структура за исключением индивидуаль-

ного значения (числового или строкового). Например, на рис. 6 элемент «Screen» имеет строковый параметр «Name», который содержит в себе только одну строку со значением «BT5L-W-A1» и, соответственно, не имеет вложенности. Также об этом свидетельствует отсутствие серого треугольника слева от параметра. Элемент «Materials» имеет сложную структуру данных (как минимум несколько параметров) и слева от него имеется серый треугольник, позволяющий скрыть внутреннее содержимое данного компонента.

Данный функционал позволяет исследователю гранулировать информацию, что снижает когнитивную нагрузку и позволяет получать только те данные, которые нужны в каждом конкретном случае. Кроме того, такой подход позволяет экономить рабочее пространство монитора компьютера, что повышает среднюю информативность визуального представления.

**Заключение.** Предложен иерархический дескриптор защитного экрана, позволяющий описывать сложные зависимости и конкретные параметры радиационно стойких защитных экранов.

Описаны программная реализация функций конвертации данных в иерархический дескриптор и его применение в рамках разработки модуля когнитивной визуализации параметров многослойного защитного экрана. Также предложена интерактивная визуальная модель отображения иерархического дескриптора многослойного защитного экрана, позволяющая гранулировать информацию в процессе работы.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-18043 мк).*

#### **Библиографические ссылки**

1. Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Терехов В.В., Михайличенко С.С. Радиационная стойкость микроэлектромеханических систем // Наноинженерия. 2015. № 9 (51). С. 13—17.
2. Глушко А.А., Зинченко Л.А., Шахнов В.А. Моделирование воздействия тяжелых заряженных частиц на характеристики полевых транзисторов структуры «кремний на изоляторе» // Радиотехника и электроника. 2015. № 7. С. 1090—1096.
3. Терехов В.В., Михайличенко С.С., Зинченко Л.А., Глушко А.А. Методика определения толщины экрана для защиты микроэлектромеханических систем от воздействия высокоэнергетичных ионов / Сборник трудов конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы (TECHNOLOGY&SYSTEMS-2016)». Москва, 2016. С. 356—358.
4. Thomas J., Cook K. Illuminating the Path: Research and Development Agenda for Visual Analytics // IEEE-Press. 2005. 185 p.
5. Зенкин А.А., Поспелов Д.А. Когнитивная компьютерная графика. М.: Наука, 1991.
6. The JSON Data Interchange Syntax 2-nd Edition / December 2017. URL: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf> (дата обращения: 08.04.2020).

#### **Ссылка для цитирования**

**Зинченко Л.А., Казаков В.В., Миронов А.А.** Иерархический дескриптор для отображения информации о многослойных радиационно стойких экранах защиты электронной аппаратуры // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 171—176.

### **Требования к оформлению библиографических ссылок**

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.



УДК 681.3

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-4-177-182

**Н.Ю. Рязанова**, канд. техн. наук, доц., **С.В. Осипова**, **Т.Ю. Михайлова**  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

ryaz\_nu@mail.ru, osipovaal23@yandex.ru

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КЛАССИФИКАТОРА СЕТЕВОГО ТРАФИКА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

*Приведены обзор и анализ методов построения классификаторов сетевого трафика и показано преимущество методов глубокого обучения. На основе сравнительного анализа выбраны методы глубокого обучения с учителем. Рассмотрен метод, основанный на использовании многослойной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (LSTM). Создана структура глубокой сети, на вход которой подаются потоки необработанных данных, разделённые на сессии. На основе выбранных классов приложений экспериментально доказано, что разработанная нейронная сеть долгой краткосрочной памяти, на вход которой подаются необработанные данные, позволяет получить высокую точность классификации.*

**Ключевые слова:** сетевой трафик; глубокое обучение; нейронная сеть долгой краткосрочной памяти; необработанные данные.

*An overview and analysis of methods for constructing of network traffic classifiers is given and the advantage of deep learning methods is shown. Based on a comparative analysis, the methods of deep learning with a teacher is selected. A method based on the use of a multilayer neural network of long short-term memory (LSTM) is considered. The structure of a deep network, at the input of which raw data flows fed, divided into sessions is created. Based on the selected classes of applications, it is experimentally proven that the developed neural network of long short-term memory, to the input of which raw data is supplied, allows to obtain a high classification accuracy.*

**Keywords:** network traffic; deep learning; long short-term memory neural network; raw data.

**Введение.** В последнее время классификация интернет-трафика востребована не только при построении надёжных систем сетевой безопасности, но и для обеспечения надлежащего качества обслуживания критически важных бизнес-приложений путём оптимизации существующих сетевых ресурсов в соответствии с QoS [1—3]. Оптимизация, в первую очередь, требует правильной идентификации различных потоков трафика. Быстрое развитие мультимедийных и широкополосных приложений усложняет задачу классификации трафика и требует новых подходов. В последнее время спектр классификационных методов значительно расширился — от простой классификации на основе портов статистически значимых составляющих передаваемых данных до методов глубокого обучения [4—6].

В статье на основе сравнительного анализа методов классификации сетевого трафика и проведённого анализа методов глубокого обучения для построения классификатора предлагается использовать метод на основе многослойной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (англ. Long Short-term Memory — LSTM), на вход которой подаются потоки необработанных данных. Экспериментально доказано, что использование необработанных

потоков данных, подаваемых на вход классификатора, повышает общую точность классификации и позволяет достичь высокой точности классификации по каждому классу.

**Обзор подходов к классификации.** Как известно, первым появился подход, основанный на использовании номеров портов. Использование нестандартных портов, сокрытие пользователей и постоянно растущий объём трафика в сети делают традиционный метод на основе портов ненадёжным.

Следующее поколение классификаторов сетевого трафика используют метод DPI (англ. Deep Packet Inspection — DPI), который выполняет классификацию на основе полезной нагрузки, поиска и проверки шаблонов или ключевых слов. Очевидно, что такой подход не применим к зашифрованному трафику и, поскольку пакеты обрабатываются как стеки, требует значительных вычислительных затрат. Для преодоления указанных ограничений появилось новое решение, основанное на статистических и временных характеристиках потоков данных [7, 8]. Эти методы обычно предусматривают использование алгоритмов классического машинного обучения (англ. Machine Learning — ML), например, таких широко известных, как «случайный лес»

(англ. Random Forest — RF), «k-ближайший сосед» (англ. k-Nearest Neighbor — kNN), метод опорных векторов (англ. Support Vector Machines — SVM). Классификация на основе методов машинного обучения характеризуется высокими показателями точности. На вход такого классификатора подаётся вектор признаков, содержащий статистические характеристики трафика. Обычно такие векторы признаков строятся вручную разработчиками классификатора трафика, и все исследования обычно сводятся к выбору наиболее полного и, следовательно, точного вектора признаков. Основное ограничение этих методов заключается в использовании заранее выделенных предикатов, которые могут не работать в новых условиях и в отличающихся сценариях.

Глубокое обучение, т. е. использование многослойных нейронных сетей, устраняет необходимость в выборе функций экспертом, поскольку функции в процессе обучения выбираются автоматически. Эта особенность делает глубокое обучение особенно востребованным подходом для классификации при постоянном появлении новых классов, модернизации моделей старых классов и изменении условий их применения.

Ещё одна важная характеристика глубокого обучения заключается в том, что оно обладает значительно более высокой способностью к обучению по сравнению с традиционными методами машинного обучения и, таким образом, способна обучаться очень сложным образцам [9]. И, может быть, самым важным отличием является способность нейронных сетей использовать необработанные и неструктурированные данные в качестве входных.

**Классификация методов глубокого обучения.** В отличие от классификаторов на основе машинного обучения классификаторы на основе глубокого обучения умеют «самостоятельно», т. е. автоматически, выделять необходимый для классификации набор признаков. Кроме того, глубокое обучение способно распознать более сложные зависимости между входными и выходными данными [10, 11].

Глубокое обучение, так же как и машинное обучение, по известной классификации делится на обучение с учителем, обучение без учителя и обучение с частичным привлечением учителя (англ. semi-supervised learning).

В рамках классификации решается одна из следующих задач:

классификация размеченных данных (обучение с учителем);

классификация неразмеченных данных или кластеризация (без учителя);

классификация частично размеченных данных (частично контролируемое обучение).

Обучение с учителем используется в регрессионных и классификационных моделях. При обучении с учителем нейронная сеть обучается на соответствующем наборе данных, так называемом дата-сете, и формирует ответы, которые используются для оценки точности алгоритма на обучающих данных. Наличие дата-сета означает, что каждому классу входных данных в обучающем наборе соответствует ответ, который алгоритм и должен получить.

Сравнительный анализ методов глубокого обучения с учителем показывает, что в задачах классификации в настоящее время используются рекуррентные нейронные сети (англ. Recurrent Neural Network — RNN) и, в частности, их разновидность — сети долгой краткосрочной памяти (LSTM), а также свёрточные нейронные сети (СНС или англ. Convolutional Neural Network — CNN). В ранних работах использовались многослойный перцептрон (англ. Multilayered perceptron — MLP) или сети прямого распространения (англ. Feed Forward Neural Network — FFNN).

В работе [12] приведено детальное сравнение RNN, LSTM и FFNN. Убедительно доказано, что сети с прямым распространением сигнала имеют наименьшую точность классификации. Рекуррентные нейронные сети показали лучший результат при работе с небольшими обучающими выборками, в то время как нейронные сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), дополненные методом прореживания или исключения (англ. Dropout) для устранения проблемы переобучения нейронной сети, показали значительно лучший результат при обучении на выборках большого размера.

Для обоснованного выбора метода построения классификатора был проведён сравнительный анализ свёрточных сетей (CNN) и сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM). М. Loren-Martin [13] провёл анализ результатов работы 2D-CNN + LSTM. Hyun-Kyo [14] представил результаты сравнительного анализа многослойной сети LSTM и 2D-CNN + LSTM. В работе [15] W. Wan сравнил нейронные сети 2D-CNN и 2D-CNN + LSTM. Gonzalo Mar'in [16] продемонстрировал результаты анализа нейронной сети 1D-CNN + LSTM, а W. Wang [17] сравнил сети 1D-CNN и 2D-CNN. Полученные в перечисленных работах результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнительный анализ нейронных сетей

№ п/п	Метод классификации	Представление данных	Выходные классификаторов	Точность, %
1	2D-CNN + LSTM	Выборочные данные уровня пакета	Приложение	96,32
2	Много-слойная LSTM	Последовательные данные по пакетам	Приложение	99,65
	2D-CNN + LSTM			98,86
3	2D-CNN	Последовательные данные	Вредоносные приложения	99,69
	2D-CNN + LSTM	Последовательные данные по пакетам		99,89
4	1D-CNN + LSTM	Последовательные данные по пакетам	Обычные приложения	87,8
			Вредоносные приложения	54,7

По сути, трафик — это данные, передаваемые пакетами, которые следуют один за другим. Следовательно, сетевой трафик по своей структуре является временной последовательностью. Сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) предназначены для работы с временными последовательностями. Из таблицы видно, что точность классификации с помощью LSTM немного, но всё же выше, чем при использовании свёрточных или комбинации слоёв свёрточной сети и сети с долгой краткосрочной памятью.

Выбор такой модели классификации предполагает ряд ограничений на вектор признаков, характеризующих трафик. Вектор признаков должен представлять набор характеристик трафика в порядке возрастания временной отметки, т. е.  $i$ -й элемент такого вектора также является вектором, описывающим характеристики  $i$ -го пакета в потоке.

Существует два подхода к преобразованию необработанных данных трафика для последующей передачи их на вход классификатора.

В первом подходе трафик рассматривают как непрерывную последовательность байт, т. е. в виде одномерного массива. Такие одномерные массивы обычно имеют фиксированную длину. Если сессия или поток содержит большее количество байт, то такая сессия урезается, если же меньшее, то дополняется незначительными

нулями. Очевидно, что такой подход может быть использован для организации входных данных для одномерной и двумерной сети CNN. Такой подход к представлению необработанных байт трафика был использован в работах [18, 19].

Вторым подходом к преобразованию необработанных байт трафика является организация его в виде массива пакетов [20]. При таком подходе исследователь выбирает фиксированные размеры сессии в пакетах и каждого пакета в сессии. Если сессия или поток содержит большее количество пакетов, то такой поток урезается, если же меньше, то дополняется нулевыми пакетами. Аналогично регулируется длина пакета. Такой подход к представлению трафика широко используется для организации входных данных RNN, а также комбинации RNN и CNN, так как при этом данные представляются последовательностью пакетов во времени. Реже такой подход используется для двумерных CNN. Второй подход наиболее полно отвечает особенностям LSTM.

Необработанные данные трафика подвергаются предобработке, чтобы привести их к формату, поддерживаемому классификатором.

Также для улучшения качества классификации в каждом пакете удаляются такие данные, как ip-адрес и порт, а также мак-адрес источника и получателя, чтобы исключить возможность классификации на основе этих изменяющихся параметров.

В качестве фиксированных значений были выбраны 60 пакетов — длина сессии, размер одного пакета — 512 байт.

**Построение многослойной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM).** Повышение точности классификации нейронной сети может быть достигнуто либо с помощью увеличения глубины нейронной сети (числа слоёв), либо путём увеличения нейронной сети в ширину (нейронов на каждом слое).

Наиболее распространённым методом выбора параметров нейронной сети является перекрёстная проверка или кросс-валидация (англ. Cross-validation) [21].

На первом этапе нейронная сеть была увеличена в глубину, затем точность регулировалась за счёт увеличения её ширины. С помощью метода перекрёстной проверки были протестированы двухслойная, трёхслойная и четырёхслойная LSTM. Результаты тестирования методом кросс-валидации представлены в табл. 2.

По результатам анализа методом кросс-валидации выбрана многослойная нейронная сеть, первые четыре слоя которой — LSTM, затем три полносвязных слоя, а последний яв-

Таблица 2

## Результаты тестирования методом кросс-валидации

Количество слоёв LSTM	Количество полносвязных слоёв	Количество нейронов на каждом слое LSTM и полносвязном	Средняя точность по кросс-валидации, %
1	1	(120, 120)	93,3920 (±1,5924)
	2	(120, 120, 120)	92,9515 (±1,5930)
	3 + 3 слоя регуляризации	(120, 120, 120, 120, 120)	91,6299 (±1,4323)
2	1	(120, 120, 120)	92,5110 (±1,4297)
	3 + 3 слоя регуляризации	(120, 120, 120, 120, 120)	94,7489 (±1,4323)
3	1	(120, 120, 120, 120, 120)	92,0703 (±1,5924)
	3 + 3 слоя регуляризации	(120, 120, 120, 120, 120, 120)	96,5798 (±1,6772)
4	1	(120, 120, 120, 120, 120)	95,2731 (±1,5924)
	2	(120, 120, 120, 120, 120, 120)	94,7136 (±1,4323)
	3 + 3 слоя регуляризации	(512, 512, 512, 512, 256, 128)	97,7489 (±0,8422)
	3 + 3 слоя регуляризации	(1024, 1024, 512, 512, 256, 256, 256)	99,2351 (±0,4758)

ляется полносвязным слоем с сигмоидальной функцией. Количество нейронов на каждом из скрытых слоёв равно 1024, 1024, 512, 512, 256, 256, 256 соответственно (рис. 1).

**Исследование разработанной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM).** Для анализа работы предлагаемой нейронной сети использовались четыре класса: Internet Explorer, Safari, Chrome, Fire Fox.

Матрица ошибок (матрица неточностей) — таблица, которая позволяет визуализировать эффективность алгоритма классификации путём сравнения прогнозируемого значения целевой переменной с её фактическим значением. Столбцы матрицы представляют наблюдения в прогнозируемом классе, а строки — наблюдения в фактическом классе (или наоборот).

Оценка точности классификации выполнялась на основе матрицы ошибок (рис. 2).

Для оценки качества классификации предлагаемой многослойной нейронной сети использовались следующие метрики: accuracy, precision, полнота и F-мера [22].

Точность (accuracy) — оценка количества правильных ответов классификатора является

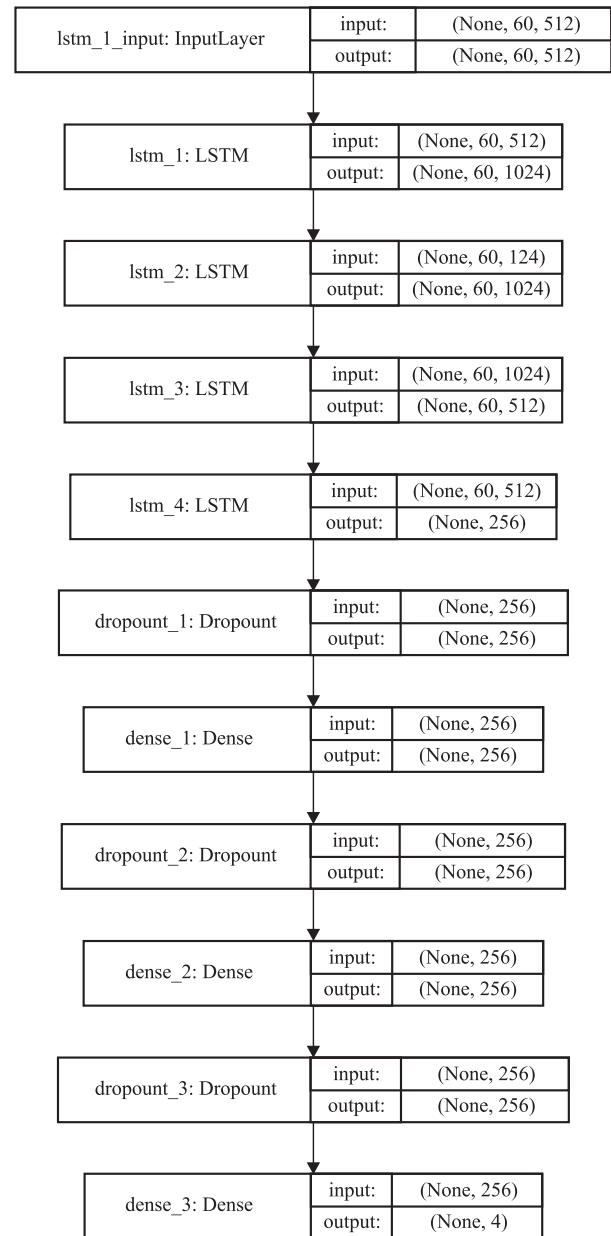


Рис. 1. Структура полученной нейронной сети

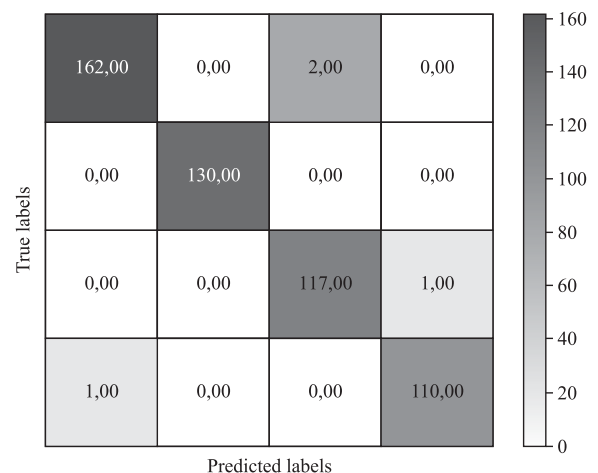


Рис. 2. Матрица ошибок

ся оценкой общей точности классификации и вычисляется по формуле

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}. \quad (1)$$

Точность (precision) определяется как отношение соответствующего диагонального элемента матрицы ошибок и суммы всей строки класса. Можно сказать, что precision определяет точность по классам. Такая оценка особенно важна, когда выборки по разным классам имеют разные размеры:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (2)$$

Полнота (recall) определяет, сколько истинных результатов было верно предсказано, и вычисляется по формуле

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (3)$$

F1-мера (F1-score) является средним гармоническим точности и полноты. Максимизация этого функционала приводит к одновременной максимизации двух «ортогональных критериев»:

$$F1 = \frac{2}{\frac{1}{TP/TP + FP} + \frac{1}{TP/TP + FN}} = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}, \quad (4)$$

где  $TP$  — истинно-положительный (true-positive);  $FP$  — ложно-положительный (false-positive);  $TN$  — истинно-негативный (true-negative);  $FN$  — ложно-негативный (false-negative).

Кривая ошибок или ROC графически характеризует качество бинарного классификатора, зависимость доли верных положительных классификаций от доли ложных положительных классификаций при варьировании порога решающего правила.

В табл. 3 представлены результаты оценки точности классификации по метрикам accuracy, precision, recall, F1-score.

На рис. 3 показана кривая ошибок разработанного классификатора для каждого класса.

Проведённый анализ разработанной глубокой нейронной сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), на вход которой подаются последовательные данные в пакетах, показал точность 99,23 % и точность по каждому классу 99 %.

Таблица 3

## Оценка точности разработанного метода

Класс	Точность	Полнота	F1-мера	Количество
IE	0,99	0,99	0,99	163
Safari	1,00	1,00	1,00	130
Chrome	0,99	0,98	0,98	119
FF	0,99	0,99	0,99	111
Общая точность	—	—	0,99	523

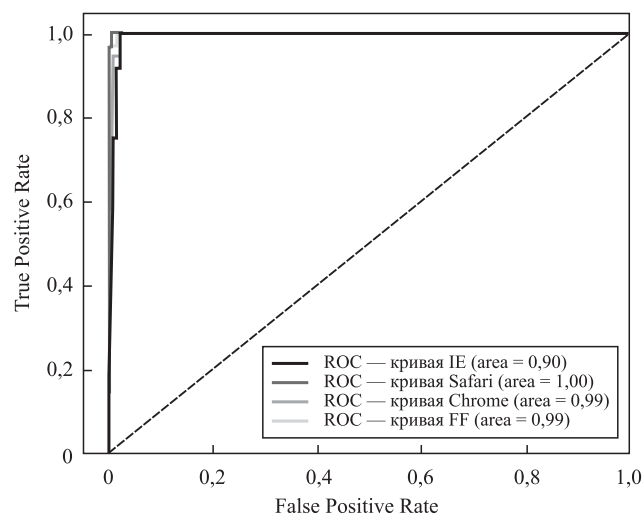


Рис. 3. График ошибок классификатора

**Выводы.** В работе проведён анализ методов классификации зашифрованного трафика на основе глубоких нейронных сетей. На основе сравнительного анализа свёрточных сетей (CNN), сетей с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и их комбинации для построения классификатора выбрана многослойная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM). На выходном слое для определения принадлежности к заданным классам применяется сигмоидальная функция, что позволяет при поступлении на вход классификатора трафика, который не принадлежит ни к одному из заданных классов, отметить это.

На основе существующих ограничений классификатора выбран формат входных данных, подаваемых на вход классификатора. Показано, что при подаче на вход классификатора необработанных потоков пакетов данных, разделённых на сессии, повышается точность классификации приложений.

Экспериментально доказано, что построенный классификатор даёт высокие показатели точности классификации до 99,23 %.

**Библиографические ссылки**

1. **Ершов Н.Г., Рязанова Н.Ю.** Комплексная аналитическая оценка надёжности анонимной сети // Инженерный вестник. 2017. № 6. С. 20—31.
2. **Филиппов М.В., Рязанова Н.Ю., Рязанцев Б.И.** Метод перехвата исходящих и входящих сетевых пакетов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 12. С. 45—56.
3. **Рязанова Н.Ю., Якиль К.А.** Фильтрация SMS-спама // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 19—24.
4. **Siswanto A., Syukur A.** Network Traffic Monitoring and Analysis Using Packet Sniffer / The second International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2019, Rabat, Morocco. DOI: 10.1109/COMMNET.2019.8742369.
5. **Kim E., Kwon Y., Kim Y.** A method for providing seamless on-demand application service using DPI in IP network [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/254038537\\_A\\_method\\_for\\_providing\\_seamless\\_on-demand\\_application\\_service\\_using\\_DPI\\_in\\_IP\\_network](https://www.researchgate.net/publication/254038537_A_method_for_providing_seamless_on-demand_application_service_using_DPI_in_IP_network) (дата обращения: 07.09.2020). DOI: 10.1109/IB2Com.2011.6217890.
6. **Гольдштейн Б.С., Елагин В.С., Зарубин А.А., Фицов В.В.** Методы инспекции пакетов и анализа трафика. СПб.: СПбГУТ, 2018. Информационные системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://iks.sut.ru/rubricator/metody-inspekcii-paketov-i-analiza-trafika-tehnologiya-dpi/> (дата обращения: 07.09.2020).
7. **Щербак Н.Г.** Анализ IP-трафика методами Data Mining // Проблемы информатики. 2012. № 4 (Вычислительные и сетевые ресурсы). С. 30—46.
8. **Ванюшина А.В.** Классификация IP-трафика в компьютерной сети с использованием алгоритмов машинного обучения: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.15. 2020 [Электронный ресурс] <https://www.dissertac.com/content/klassifikatsiya-ip-trafika-v-kompyuternoi-seti-s-ispolzovaniem-algoritmov-mashinnogo-obuchen> (дата обращения: 07.09.2020).
9. **Marin G., Casas P., Capdehourat G.** DeepMAL — Deep Learning Models for Malware Traffic Detection and Classification Computer Science. 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/DeepMAL-Deep-Learning-Models-for-Malware-Traffic-Marine-Casas/0a0e59694b9a4c1f5ef5e1690176faebb7d2f95b> (дата обращения: 07.09.2020).
10. **Wang W., Sheng Yi., Wang Ji.** и др. HAST-IDS: Learning Hierarchical Spatial Temporal Features using Deep Neural Networks to Improve Intrusion Detection // IEEE Access. 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2780250.
11. **Bu Z., Zhou B., Cheng P., Zhang K.** Encrypted Network Traffic Classification Using Deep and Parallel Network-In-Network Models // IEEE Access. 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010637.
12. **Плохов А.С.** Использование нейросетевых методов для прогнозирования финансовых потоков ВКР. СПб.: СПбГУ, 2018. 32 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/13191/1/Plokhov.pdf> (дата обращения: 09.10.2020).
13. **Lopez-Martin M., Carro B., Sanchez-Esguevillas A., Lloret J.** Network traffic classifier with convolutional and recurrent neural networks for internet of things, IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 18042—18050.
14. **Lim H., Ju-Bong Kim, Han Y.** Payload-Based Traffic Classification Using Multi-Layer LSTM in Software Defined Networks. 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Payload-Based-Traffic-Classification-Using-LSTM-Lim-Kim/95897fcf75e8b30f7d4814765e828cf9ff4e18ce#paper-header> (дата обращения: 07.09.2020).
15. **Wang W., Zeng X., Ye X., Sheng Y., Zhu M.** Malware Traffic Classification Using Convolutional Neural Networks for Representation Learning / In the 31<sup>st</sup> International Conference on Information Networking (ICOIN), Accepted, 2017.
16. **Marin G., Casas P., Capdehourat G.** Deep MAL — Deep Learning Models for Malware Traffic Detection and Classification. Reprint, arXiv: 2003.04079 v2 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://deepai.org/publication/deepmal-deep-learning-models-for-malware-traffic-detection-and-classification> (дата обращения: 07.09.2020).
17. **Wang W., Sheng Y., Wang Ji.** Learning Hierarchical Spatial-Temporal Features Using Deep Neural Networks to Improve Intrusion Detection // Computer Science IEEE Access. 2017. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2780250. Corpus ID: 3441568 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/321738892\\_HAST-IDS\\_Learning\\_Hierarchical\\_Spatial-Temporal\\_Features\\_using\\_Deep\\_Neural\\_Networks\\_to\\_Improve\\_Intrusion\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/321738892_HAST-IDS_Learning_Hierarchical_Spatial-Temporal_Features_using_Deep_Neural_Networks_to_Improve_Intrusion_Detection) (дата обращения: 07.09.2020).
18. **Wang Z.** The Applications of Deep Learning on Traffic Identification. 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.net/4041909-The-applications-of-deep-learning-on-traffic-identification.html> (дата обращения: 07.09.2020).
19. **Wang W., Zhu M., Wang J., Zeng X., Yang Z.** End-to-end encrypted traffic classification with one-dimensional convolution neural networks, In Intelligence and Security Informatics (ISI) / IEEE International Conference on, Jul. 2017. P. 43—48.
20. **Wang P., Chen X., Ye F.** A Survey of Techniques for Mobile Service Encrypted Traffic Classification Using Deep Learning. 2019. DOI: 10.1109/IEEE ACCESS.2019.2912896.
21. **Oluranti J., Omoregbe N., Misra S.** Empirical Comparison of Cross-Validation and Test Data on Internet Traffic Classification Methods // Journal of Physics Conference Series. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1299/1/012044. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/336330818\\_Empirical\\_Comparison\\_of\\_Cross-Validation\\_and\\_Test\\_Data\\_on\\_Internet\\_Traffic\\_Classification\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/336330818_Empirical_Comparison_of_Cross-Validation_and_Test_Data_on_Internet_Traffic_Classification_Methods) (дата обращения: 07.09.2020).
22. **Ершов Н.Г., Рязанова Н.Ю.** Выбор метрик для оценки надёжности сокрытия факта контакта в глобальной сети / В сб.: Теоретические и практические исследования XXI века: труды II междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 80—81.

**Ссылка для цитирования**

**Рязанова Н.Ю., Осипова С.В., Михайлова Т.Ю.** Метод построения классификатора сетевого трафика на основе глубокого обучения // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 177—182. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-4-177-182.

УДК 681.513

Ху Цяоцу

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

hqchqc3@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Рассмотрена компактная процедура идентификации меняющихся параметров нелинейной модели погрешностей инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата, основанная на скалярном подходе и SDC-представлении нелинейной модели. Исследована процедура параметрической идентификации средней частоты случайного изменения дрейфа гироскопа. Результаты моделирования подтвердили эффективность процедуры параметрической идентификации.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; инерциальная навигационная система; нелинейная модель погрешностей; SDC-представление; скалярный подход; случайный дрейф гироскопа.

*A compact procedure for the changing parameters identification of a errors nonlinear model of an inertial navigation system for an unmanned aerial vehicle, based on the scalar approach and SDC representation of the nonlinear model, is considered. The procedure for parametric identification of the average frequency of a random change in the gyroscope drift is investigated. The simulation results confirmed the effectiveness of the parametric identification procedure.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; inertial navigation system; nonlinear error model; SDC representation; scalar approach; random gyroscope drift.

**Введение.** Исследовано алгоритмическое обеспечение навигационного комплекса (НК) беспилотного летательного аппарата (БЛА). В состав НК БЛА включены инерциальная навигационная система (ИНС), приёмник GPS-сигналов и спецвычислитель, в котором реализуются алгоритмическое обеспечение НК и системы управления БЛА [1—3]. НК имеет погрешности, связанные с незащищённостью радиоканала и ИНС. В условиях активных и пассивных помех сигнал GPS становится сопоставим по точности с ИНС, а уровень ошибок GPS существенно повышается, поэтому использовать сигналы для навигации БЛА не представляется возможным. Ошибки ИНС, в основном, вызваны нестабильностью чувствительных элементов, поэтому ИНС и GPS объединяют в НК.

Обычно алгоритмическое обеспечение НК включает линейный фильтр Калмана [4, 5] или его адаптивные модификации [6], которые оценивают погрешности ИНС и проводят последующую компенсацию в выходном сигнале системы. Используемая в фильтре Калмана (ФК) модель определяет связи погрешностей ИНС.

Бесплатформенные ИНС (БИНС), выполненные на базе MEMS-элементов, отличаются

экономичностью, но их погрешности носят явно выраженный нелинейный характер [7]. Платформенные ИНС хорошо отработаны на практике, но имеют большую стоимость, габариты и массу. С течением времени работы ИНС углы отклонения гироплатформы (ГСП) увеличиваются, и модель погрешностей ИНС становится неадекватной реальному процессу.

Коррекция НК с помощью ФК отличается относительной простотой реализации и невысокой точностью. Дальнейшее упрощение реализации алгоритмического обеспечения проводится с помощью скалярного подхода [8], который позволяет представить ФК в виде формул с переменными коэффициентами, что снижает точность оценивания, но существенно упрощает процесс получения оценок погрешностей ИНС.

Высокоточная коррекция НК различных летательных аппаратов осуществляется с помощью нелинейного фильтра Калмана (НФК) [9—11], который чрезвычайно сложен в реализации на борту БЛА. В условиях маневрирования БЛА априорные нелинейные модели изменения погрешностей ИНС становятся неадекватными реальному процессу, поэтому

применяют модификации НФК, которые проводятся с помощью нейронных сетей, генетических алгоритмов и алгоритмов самоорганизации, что ещё более усложняет реализацию алгоритма в спецвычислителе.

Алгоритмы построения моделей позволяют построить модель исследуемого процесса с высокой точностью, но эти модели являются нефизичными, их структура заранее неизвестна и в процессе построения модели постоянно изменяется. Алгоритмы построения моделей требуют повышенной производительности бортового вычислителя, поэтому их использование в рассматриваемой задаче затруднительно.

Альтернативным вариантом адаптации НФК являются различные способы идентификации параметров матрицы модели [8, 11], например, применение метода наименьших квадратов, но при этом вычислительные затраты возрастают.

Таким образом, в платформенных ИНС БЛА для сохранения адекватности модели погрешностей ИНС необходимо использовать коррекцию в структуре ИНС с помощью регулятора [8, 12] и простой компактный способ параметрической идентификации (ПИ) модели. Для параметрической идентификации нелинейных

моделей в работе [12] предложена компактная процедура параметрической идентификации на основе использования SDC-представления (State Dependent Coefficient), которое позволяет представить нелинейную модель в виде модели с линейной структурой [13].

В практических приложениях некоторые параметры матриц моделей НК достоверно неизвестны, поэтому их идентификация является актуальной задачей.

В статье исследована задача коррекции НК БЛА с помощью нелинейного регулятора и компактной ПИ.

**Нелинейная модель погрешностей инерциальной навигационной системы.** Как уже отмечалось, в практических приложениях при маневрировании БЛА модели погрешностей ИНС становятся неадекватными реальным процессам [14, 15]. Поэтому в НК исследуемого БЛА применяются ПИ для нелинейных систем. ПИ нелинейных моделей [16, 17] осуществляется с применением SDC-представления.

SDC-представление нелинейной модели погрешностей ИНС имеет вид [12, 13]

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}(t_{k-1}, \mathbf{x}_{k-1})\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (1)$$

где

$$\mathbf{F}(t_{k-1}, \mathbf{x}_{k-1})\mathbf{x}_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & -gx_{3,k-1}T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & gx_{4,k-1}T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \frac{T}{R} \operatorname{tg} \varphi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \beta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \beta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - \beta T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1,k-1} \\ x_{2,k-1} \\ x_{3,k-1} \\ x_{4,k-1} \\ x_{5,k-1} \\ x_{6,k-1} \\ x_{7,k-1} \\ x_{8,k-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \delta V_{E,k} \\ \delta V_{N,k} \\ \Phi_{E,k} \\ \Phi_{N,k} \\ \Phi_{H,k} \\ \varepsilon_{E,k} \\ \varepsilon_{N,k} \\ \varepsilon_{H,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \\ x_{3,k} \\ x_{4,k} \\ x_{5,k} \\ x_{6,k} \\ x_{7,k} \\ x_{8,k} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix} B_{E,k-1} \\ B_{N,k-1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ w_{E,k-1} \\ w_{N,k-1} \\ w_{H,k-1} \end{bmatrix};$$

$\delta V_E, \delta V_N$  — погрешности в определении скорости БЛА;  $\Phi_E, \Phi_N, \Phi_H$  — углы отклонения приборной системы координат относительно опорной системы координат;  $\varepsilon_E, \varepsilon_N, \varepsilon_H$  — скорости дрейфа гироскопов;  $\varphi$  — широта местоположения;  $w_E, w_N, w_H$  — возмущающие внешние воздействия;  $B_E, B_N$  — смещение нулей акселерометров;  $\beta$  — средняя частота случайного изменения дрейфа гироскопов;  $R$  — радиус Земли;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $T$  — период дискретизации.



Для сокращения вычислительных затрат применяют модели для каждого информационного канала погрешностей ИНС. С учётом коррекции в структуре ИНС с помощью регулятора SDC-модель погрешностей имеет вид

$$x_k = F_{k-1}x_{k-1} + Gu_{k-1}, \tag{2}$$

$$\text{где } F_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 + \frac{T}{R}x_1 & T \\ 0 & 0 & (1-\beta)T \end{bmatrix}_{k-1}; \quad G = BT = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & A\sqrt{2\beta}T \end{bmatrix};$$

$A$  — среднеквадратическое отклонение случайного дрейфа;  $u$  — вектор управления.

Уравнение измерений имеет вид

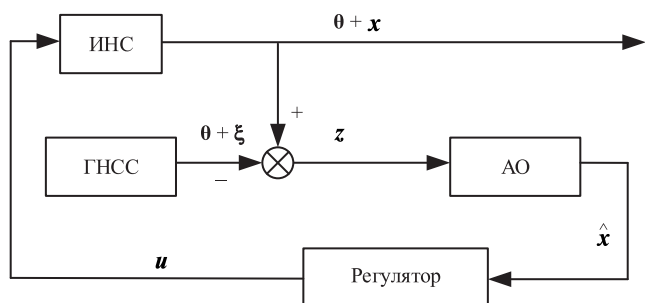
$$z_k = Hx_k + v_k, \tag{3}$$

где  $z_k$  — вектор измерений;  $H$  — матрица измерений;  $v_k$  — измерительный шум, который является дискретным аналогом белого гауссового шума с нулевым математическим ожиданием.

Уравнения (2) и (3) используются в алгоритмическом обеспечении схемы коррекции ИНС.

**Схема коррекции навигационного комплекса.** При функционировании БЛА на длительных временных интервалах для предотвращения нарастания погрешностей ИНС применяется коррекция в структуре ИНС с помощью линейного редуцированного регулятора [8, 12]. ИНС с коррекцией в структуре представлена на рисунке.

Для повышения точности коррекции применяют нелинейные модели погрешностей ИНС. В качестве АО использован НФК, а нелинейный регулятор реализован с помощью SDC-метода. В нелинейном регуляторе приме-



**Схема подключения к ИНС алгоритма оценивания и регулятора:**

АО — алгоритм оценивания;  $\theta$  — истинная навигационная информация;  $\xi$  — вектор погрешностей GPS;  $x$  — вектор погрешностей ИНС;  $z$  — вектор измерений;  $\hat{x}$  — оценка вектора погрешностей ИНС;  $u$  — вектор управления

няется нелинейная SDC-модель погрешностей ИНС. Соответственно, неизвестные параметры модели целесообразно идентифицировать с помощью ПИ, которая основана на модели, также преобразованной SDC-методом.

**Процедура параметрической идентификации средней частоты изменения дрейфа гироскопа.** При совершении БЛА манёвров средняя частота изменения скорости дрейфа гироскопов может существенно меняться. Поэтому в моделях погрешностей ИНС (1) и (2) целесообразно проводить идентификацию именно этого параметра. Информация о состоянии объекта исследования содержится в измерениях  $z$ . Таким образом, ставится задача по измерению  $z$  оценить параметр  $\beta$ .

ПИ позволяет определить матрицу-строку  $[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$  в следующей форме:

$$z_{k+n} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] \begin{bmatrix} z_k \\ z_{k+1} \\ \dots \\ z_{k+n} \end{bmatrix} + v_k^0, \tag{4}$$

$$\text{где } [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] = HF_{k+n-1}LF_k \begin{bmatrix} H \\ HF_k \\ L \\ HF_{k+n-2}LF_k \end{bmatrix}^{-1};$$

$v_k^0$  — приведённый измерительный шум [12].

В данном случае размерность вектора состояния равна 3. Следовательно, для того чтобы об-

ратить матрицу  $\begin{bmatrix} H \\ HF_k \\ L \\ HF_{k+n-2}LF_k \end{bmatrix}$ , достаточно выб-

рать  $n=3$ , т. е.  $[a_1 \ a_2 \ a_3] = HF_{k+2}F_{k+1}F_k \begin{bmatrix} H \\ HF_k \\ HF_{k+1}F_k \end{bmatrix}^{-1}$ .

Сформируем матрицу

$$\begin{bmatrix} H \\ HF_k \\ HF_{k+1}F_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -gT & 0 \\ \left(1 - \frac{gT^2}{R}\right) & -\left(2gT + \frac{gT^2}{R}x_1^{k+1}\right) & -gT^2 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

**Результаты моделирования.** Представлены результаты моделирования погрешностей ИНС при коррекции в выходном сигнале

Таблица 1

## Точность коррекции НК

Алгоритмы	Точность коррекции в выходном сигнале ИНС, %	Точность коррекции ИНС с регулятором, %
ФК	72	75
АФК	78	80
НФК	81	80
НФК с ПИ	89	93

Таблица 2

## Точность коррекции ИНС при увеличении средней частоты изменения дрейфа гироскопов

Алгоритмы	Точность коррекции в выходном сигнале ИНС, %	Точность коррекции ИНС с регулятором, %
ФК	67	70
АФК	75	78
НФК	76	73
НФК с ПИ	87	92

с помощью АО и при коррекции в структуре системы с помощью регулятора.

Точность коррекции НК с помощью упомянутых алгоритмов приведена в табл. 1.

При моделировании использована тестовая модель (2). Эта же модель применяется в АО.

Имитация совершения БЛА манёвров осуществлена путём увеличения средней частоты изменения дрейфа гироскопа на два порядка. При моделировании использована изменённая тестовая модель, а в АО применяются модели (2).

Точность коррекции НК с помощью указанных алгоритмов в условиях изменения средней частоты изменения дрейфа гироскопов на два порядка представлена в табл. 2.

**Заключение.** Разработано алгоритмическое обеспечение НК БЛА, включающее НФК с ПИ и нелинейным регулятором. Представление нелинейных моделей в виде моделей с линейной структурой проведено с помощью SDC-метода. Результаты математического моделирования погрешностей ИНС с алгоритмическим обеспечением подтвердили эффективность НФК с ПИ и регулятором.

*Работа выполнена в рамках the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities in P.R. China (Программа 111, No. B 16025).*

## Библиографические ссылки

1. **Moir I., Seabridge A.G.** Aircraft Systems: Mechanical, electrical and avionics subsystems integration. Third Edition. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2008.

2. **Selezneva M.S., Neusypin K.A.** Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.

3. **Шэнь Кай, Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

4. **Julier S.J., Uhlmann J.K.** A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems // Defense Sensing, Simulation and Controls. 1997. Vol. 3068. P. 182—193.

5. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME. Ser. D. Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82. P. 35—45.

6. **Джанджгава Г.И., Голиков В.П., Шкред В.К.** Алгоритмы обработки информации серийных самолетных платформенных инерциальных навигационных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 11. С. 4—11.

7. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—11.

8. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009.

9. **Шахтарин Б.И.** Нелинейная оптимальная фильтрация в примерах и задачах. М.: Горячая линия — Телеком, 2014. 344 с.

10. **Шахтарин Б.И., Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

11. **Августов Л.И.** и др. Навигация летательных аппаратов в околосредном пространстве / под ред. Г.И. Джанджгавы. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2015. 529 с.

12. **Селезнева М.С.** и др. Алгоритмы обработки информации навигационных систем и комплексов летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.

13. **Афанасьев В.Н.** Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. М.: Либроком/URSS, 2015. 224 с.

14. **Бабиченко А.В.** и др. Интеллектуальные системы управления беспилотными летательными аппаратами // Инженерная физика. 2018. № 5. С. 94—102.

15. **Proletarsky A., Neusypin K.** Reserch scalar filtering algorithm with selforganization method for modeling control system // Science & military. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 17—21.

16. **Verhaegen M., Verdult V.** Filtering and system identification: a least squares approach // Cambridge University Press. 2007.

17. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2003. 370 с.

## Ссылка для цитирования

**Ху Цяоу.** Исследование процедуры параметрической идентификации погрешностей инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 183—186.

УДК 62.652

DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-4-187-192

**В.П. Подчерцев**, канд. техн. наук, доц.  
(Московский государственный технологический университет им. Н.Э. Баумана),  
**С.В. Топильская**  
(филиал АО ЦЭНКИ — НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова)  
podch@list.ru; s.v.topilskaya@mail.ru

## ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ И ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВИБРОЗАЩИТЫ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

*Представлено обоснование выбора технического решения вопроса о защите от вибраций гироскопических измерителей угловой скорости, построенных на базе динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ). Предлагаемая система виброзащиты состоит из амортизаторов, обладающих высокой упругостью, и динамических гасителей колебаний (ДГК) с нелинейными упругими и демпфирующими характеристиками. Указаны основные факторы, определяющие особенности выбора системы виброзащиты прецизионных гироскопических приборов.*

**Ключевые слова:** динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ); динамический гаситель колебаний (ДГК); система виброзащиты; гироскопический измеритель угловой скорости.

*The rationale for the choice of a technical solution to the issue of vibration protection of gyroscopic angular velocity meters, built on the basis of dynamically tuned gyroscopes (DTG) is presented. The proposed vibration protection system consists of shock absorbers with high elasticity and dynamic vibration dampers (DVD) with non-linear elastic and damping characteristics. The main factors that determine the peculiarities of choosing a vibration protection system for precision gyroscopic devices are indicated.*

**Keywords:** dynamically tuned gyroscope (DTG); dynamic vibration damper (DVD); vibration protection system; gyroscopic angular velocity meter.

**Введение.** Гироскопические приборы являются основой систем ориентации и навигации в изделиях ракетно-космической отрасли. В настоящее время развитие научно-технического прогресса в области вычислительных технологий и повышение точностных, эксплуатационных характеристик чувствительных элементов обусловили возможность создания бесплатформенных инерциальных навигационных систем и гироскопических измерителей угловой скорости (ГИУС) для систем ориентации различных космических аппаратов (КА) [1].

Точность измерения угловой ориентации порядка  $0,01^\circ$ , её поддержание со стабильностью  $0,01...0,03^\circ$  за час в течение многолетнего срока существования КА на орбите может быть достигнута применением поплавковых, динамически настраиваемых, волоконно-оптических гироскопов в качестве чувствительных элементов ГИУС [2, 3].

В отличие от указанных типов чувствительных элементов динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) одновременно обладает рядом преимуществ: малые габариты и масса;

длительный ресурс работы (порядка 15 лет), обеспечиваемый применением газодинамической опоры ротора двигателя; наличие двух осей чувствительности, позволяющих реализовать резервирование измерительных каналов прибора ГИУС; относительно низкая себестоимость изготовления при высокой точности.

Благодаря большому ресурсу работы и высокой точности измерения ДНГ с газодинамической опорой в сочетании с миниатюрными размерами созданы малогабаритные приборы типа ГИУС, нашедшие применение в таких системах ориентации КА, как «Глонасс-К», «Ямал», «Telkom», «Amos» и др. Однако из-за его конструктивных особенностей при разработке приборов типа ГИУС особое внимание необходимо уделить решению задачи по защите от вибраций чувствительного элемента.

**Обоснование выбора системы амортизации со специфическими свойствами для прецизионного гироскопического прибора.** Конструктивно прибор ГИУС представляет собой герметизированную ёмкость, образованную корпусом и кожухом. Установочная и направляющая плоскости прибора, образованные опорными

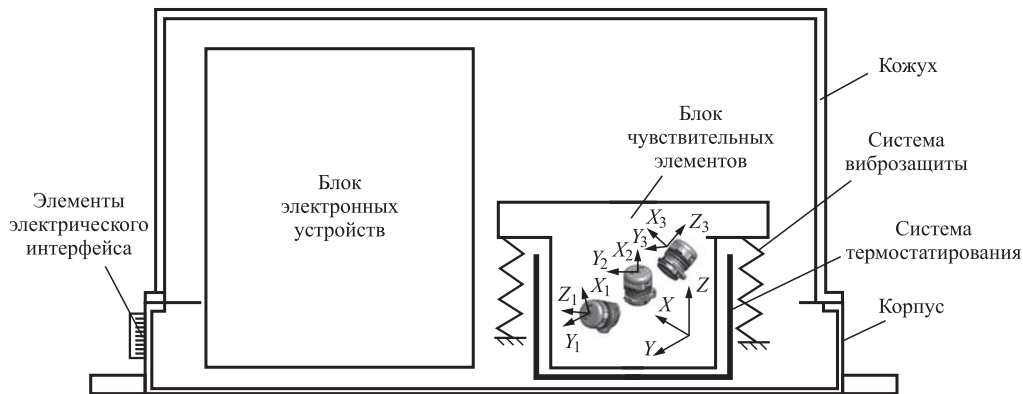


Рис. 1. Конструктивная схема прибора ГИУС

поверхностями корпуса, обеспечивают высокую точность привязки к установочной поверхности изделия. На корпусе установлены основные узлы конструкции (рис. 1):

блок чувствительных элементов;

блок сервисных электронных устройств, обеспечивающих функционирование гироскопов и передачу информации в систему управления КА;

система виброзащиты чувствительных элементов;

элементы электрического интерфейса.

При построении системы ориентации особое внимание следует уделять точности взаимного расположения чувствительных элементов (гироскопов) друг относительно друга. Установка миниатюрных ДНГ на общее основание позволяет реализовать высокую точность взаимного расположения измерительных осей чувствительности гироскопов (порядка  $10''$ ), а в качестве объекта виброзащиты выступает блок чувствительных элементов (БЧЭ), представляющий собой основание с установленными гироскопами.

Допустимые значения вибраций для прибора ГИУС определяются прочностью миниатюрного чувствительного элемента ДНГ [4]. Проведённый анализ элементов конструкции ДНГ показал, что вибродинамические характеристики ДНГ определяются упругими и демпфирующими характеристиками системы: маховик — упругий подвес (рис. 2).

В результате проведённого расчёта чувствительного элемента выявлено, что при действии ускорения  $25g$  в перемычках подвеса (минимальная толщина которых всего  $31 \text{ мкм}$ ) возникают напряжения с коэффициентом запаса 4 (рис. 3) [6, 7].

Каждый гироскоп имеет высокую жёсткость установки на основании БЧЭ, реализо-

ванной затяжкой трёх винтов М1,6 крепления гироскопа к установочной плоскости основания. Сила поджатия трёх винтов гироскопа массой  $m_{\text{ДНГ}} = 0,14 \text{ кг}$  составляет  $269 \text{ Н}$ , что даёт возможность пренебречь упругими и демпфирующими характеристиками конструкции крепежа чувствительного элемента на уровень возникающих ускорений в кон-

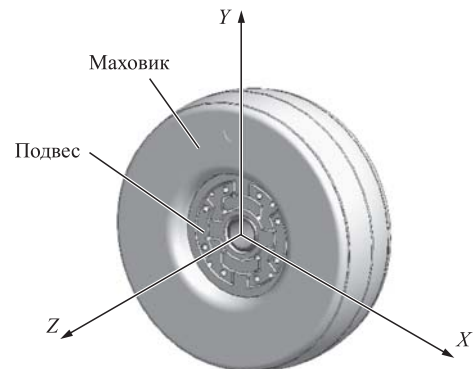
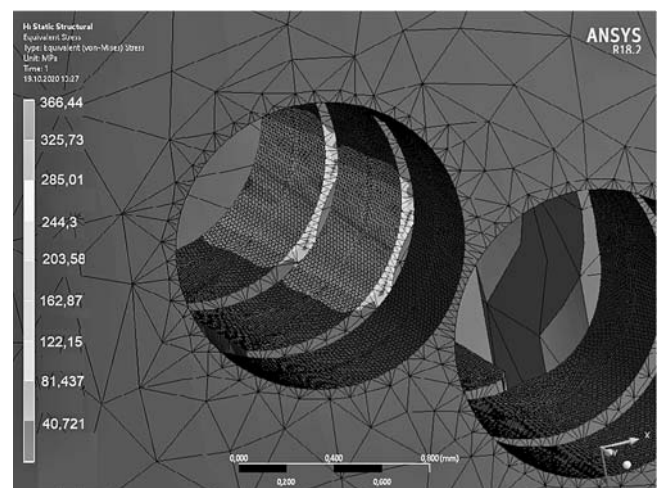


Рис. 2. Маховик, установленный на подвесе



Предел текучести материала подвеса 21НКТ-ВИ  $\sigma_T = 1300 \text{ МПа}$  [1]

Рис. 3. Напряжения в перемычках подвеса при действии ускорения  $a = 25g$

струкции ДНГ при действии вибрации на блок чувствительных элементов. Таким образом, допустимая перегрузка для объекта амортизации блока чувствительных элементов определяется вибродинамическими характеристиками ДНГ и составляет 25g.

Развитие теории и практики систем виброзащиты способствует возможности применения прецизионных гироскопических датчиков в сложных условиях эксплуатации. В настоящее время накоплен большой опыт решения задач по виброзащите благодаря применению известных амортизирующих и демпфирующих устройств [4, 8]. Но повышение требований, предъявляемых к инерциальным приборам, и расширение спектра их применения требуют развития области решения задач по защите от вибраций.

В основе решений инженерных прочностных задач механики лежат труды многих отечественных и зарубежных учёных, в частности С.П. Тимошенко [9], Я.Г. Пановко [10], С.Д. Пономарёва, В.Л. Бидермана, В.И. Феодосьева [11], Ден-Гартога, С. Крэнделла [12] и др. В основном, теоретическое исследование вопросов защиты от вибраций проводилось в авиационной, строительной, судостроительной, машиностроительной областях промышленности при разработке крупногабаритных конструкций (по сравнению с инерциальными приборами). В отечественной ракетно-космической отрасли практическим решением задач по защите от вибраций прецизионных датчиков в составе гиростабилизированных платформ и бесплатформенных инерциальных навигационных систем занимались коллективы крупных предприятий: НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова, НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина и др.

Проведённый анализ результатов исследований существующих технических решений задач по защите от вибраций [7] показал, что для снижения уровня вибраций механических систем используются амортизаторы различного типа: резиновые, резинометаллические, металлические со структурным демпфированием, а также демпфирующие устройства (гидродинамические, газодинамические, фрикционные и др.).

В технике широко используются резиновые амортизаторы [12], обладающие рядом преимуществ: простота конструкции, удоб-

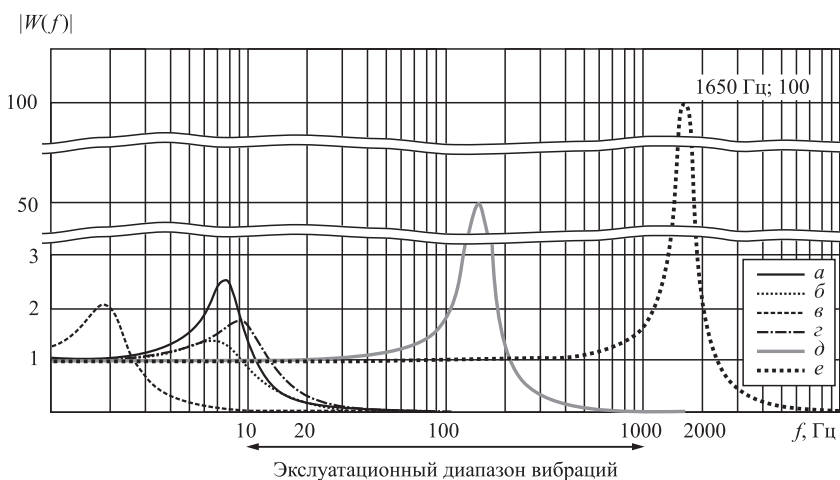


Рис. 4. АЧХ амортизируемого основания:

$a, b, v, z$  — с резиновыми амортизаторами при температуре  $T = 20, 0, 60$  и  $-20$  °С соответственно;  $d$  — со стальными амортизаторами;  $e$  — динамически настраиваемого гироскопа

ство монтажа, технологичность изготовления, высокое внутреннее демпфирование, широкий диапазон характеристик и большой ассортимент материалов для их производства, но они не всегда приемлемы из-за свойственных им недостатков, среди которых следует отметить чрезмерную зависимость амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резиновых материалов от температуры, деградацию материала, зависящую как от времени, так и от состава окружающей газовой среды и радиационного фона (рис. 4, кривые  $a, b, v, z$ ).

Кроме того, недостатком низкочастотных резиновых амортизаторов является принципиальная невыполнимость требования по обеспечению угловой стабильности положения объекта амортизации (рис. 5).

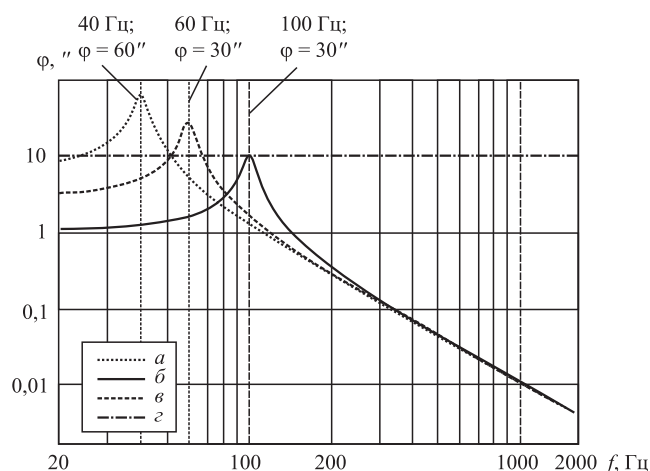
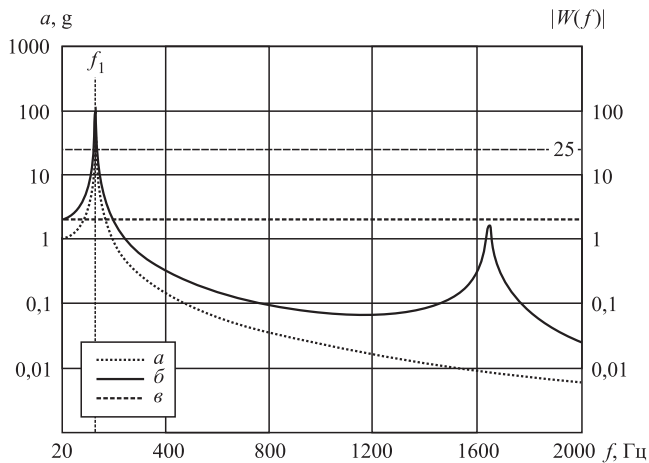


Рис. 5. Угловое положение объекта амортизации в эксплуатационном диапазоне вибраций:

$a, b, v$  — значение резонансной частоты упругого элемента 40, 60 и 100 Гц;  $z$  — допустимая угловая нестабильность положения



**Рис. 6.** Значения амплитуды колебаний гироскопа в составе БЧЭ:

*a* — при АЧХ гироскопа и системы амортизации, где  $a_{\text{доп}} = 25g$  (допустимое значение ускорения); *б* — эксплуатационное воздействие; *в* — АЧХ системы амортизации (ось ординат  $|W(f)|$ ) со значением резонансной частоты  $f_1$  добротностью  $Q = 50$

Поэтому из-за деградации свойств резиновых материалов со временем и невозможности обеспечения угловой стабильности положения объекта амортизации в качестве материала упругих амортизирующих элементов предпочтительнее использовать специальные материалы, в частности, стали, сохраняющие высокие и стабильные упругие характеристики на всех этапах движения КА, и в том числе обеспечивающие угловую стабильность положения амортизируемого объекта в течение всего срока эксплуатации гироскопического прибора.

Однако упругие свойства стальных упругих элементов служат причиной высокой добротности  $Q$  амортизируемой системы [13], при которой на резонансной частоте системы амортизации  $f_1$  ускорения, возникающие в конструкции гироскопа, превышают допустимые значения (рис. 6). Поэтому использование подобных амортизаторов требует введения дополнительных демпфирующих элементов для подавления резонансных эффектов.

Проведённый анализ результатов исследований существующих технических решений задач по защите от вибраций показал, что для снижения уровня вибраций механических систем используются различные демпфирующие устройства: гидродинамические, газодинамиче-

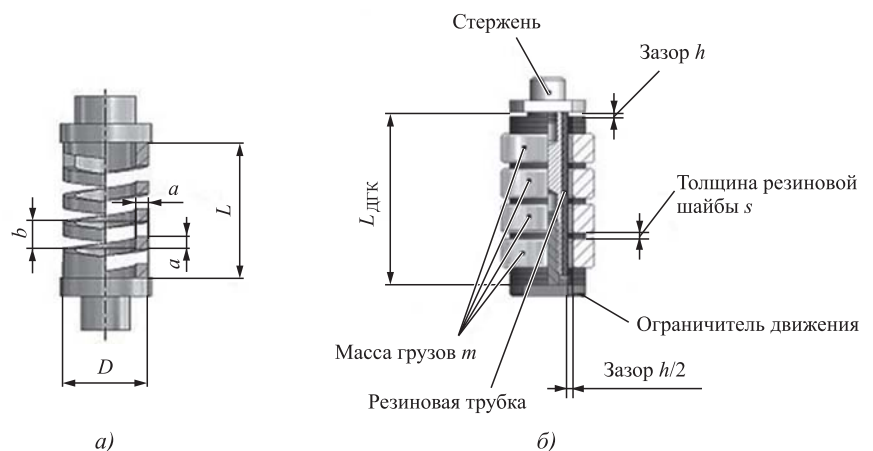
ские, фрикционные, динамические гасители колебаний и др.

Благодаря относительной простоте технологии изготовления на практике широко используются динамические гасители колебаний (ДГК), способные обеспечить высокую степень подавления колебаний на резонансной частоте системы амортизации [14, 15].

Недостатками ДГК являются наличие демпфирующих элементов, снижающих уровень подавления колебаний в высокочастотном рабочем диапазоне системы амортизации, узкая полоса частот эффективного подавления колебаний, с чем связана его высокая чувствительность к малейшим относительным изменениям параметров упругого элемента и ДГК. Снижение негативного влияния указанных недостатков позволяет применить ДГК в составе системы амортизации прецизионного гироскопического прибора.

В системе амортизации прецизионного ГИУС предлагается применить ДГК с нелинейными характеристиками [16], параметры которых определяются резонансными амплитудами колебаний системы амортизации прибора ГИУС на собственной частоте. Идея предлагаемой системы виброзащиты прецизионного ГИУС заключается в сочетании преимуществ высокоупругих амортизирующих элементов и ДГК с нелинейными характеристиками. На рис. 7 представлена конфигурация элементов выбранной системы амортизации.

Реализация в ДГК параметров упругости и демпфирования, имеющих нелинейную зависимость от амплитуды колебаний объекта амортизации, позволит снизить отрицательное влияние его демпфирующих свойств на значения коэффициента усиления системы



**Рис. 7.** Элементы предложенной системы амортизации:  
*a* — металлическая пружина; *б* — нелинейный ДГК

амортизации в рабочем высокочастотном диапазоне (в области резонанса ДНГ).

Благодаря определению оптимальных параметров ДГК возможно существенно уменьшить коэффициент передачи на собственной частоте системы амортизации  $f_1$  и значения коэффициента усиления вблизи частоты  $f_1$  на характерных частотах  $f_{\text{ДГК1}}$ ,  $f_{\text{ДГК2}}$ , не превосходящих 10, что позволит обеспечить снижение ускорений, возникающих в гироскопе при вибрационном воздействии на корпус прибора, до допустимых значений — не более 25g (рис. 8, кривая  $a$ ).

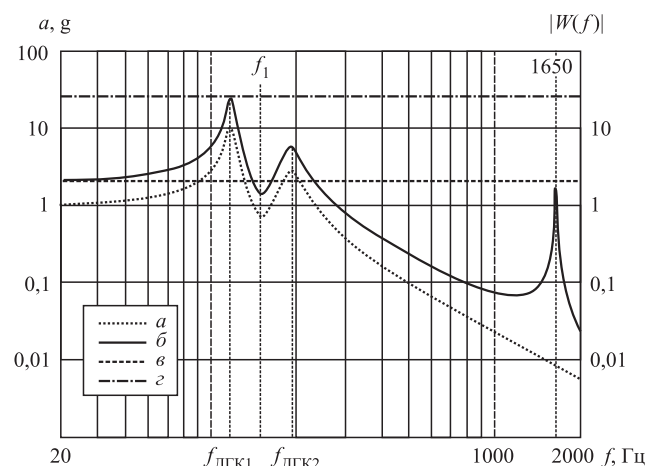
Следует отметить, что выбранное значение собственной частоты системы амортизации  $f_1 = 150$  Гц позволяет обеспечить допустимые значения амплитуд ускорений (см. рис. 8, кривая  $a$ ) во всём рабочем диапазоне амортизатора.

Графики, представленные на рис. 9, характеризуют зависимость амплитуды угловых колебаний БЧЭ при разных оптимальных значениях собственных частот системы амортизации  $f_1$ .

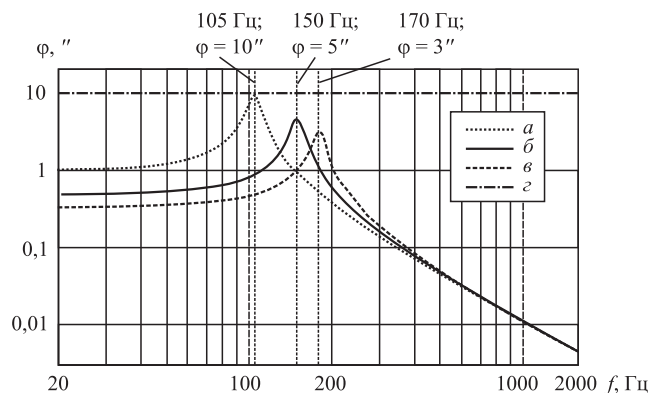
Графически определено, что при добротности  $Q = 10$  системы амортизации (реализуемой введением ДГК), значение резонансной частоты упругого элемента не должно быть ниже 105 Гц для обеспечения приемлемой стабильности углового положения объекта амортизации  $\varphi$  с учётом отклонения центра масс БЧЭ относительно центра жёсткости системы амортизации. Увеличение значения резонансной частоты  $f_1$  приводит к уменьшению значения  $\varphi$  (рис. 9, кривая  $\varphi$ ) и к увеличению амплитуды колебаний в опасной зоне — зоне резонанса ДНГ. При выбранном максимальном значении резонансной частоты  $f_1 = 170$  Гц значение  $\varphi$  составляет 3".

На рис. 10 представлена конструктивная схема системы амортизации прибора ГИУС.

**Заключение.** Выбранное техническое решение позволяет снизить действующий уровень вибраций на БЧЭ до допустимого значения во всём диапазоне частот вибраций благодаря применению нелинейного ДГК, который обеспечивает достаточное демпфирующее действие на систему только при наличии критических амплитуд колебаний, соответствующих ускорениям со значением выше допустимого ускорения 25g. В то же время нелинейный ДГК не будет снижать подавление колебаний амортизируемой системы в зоне высоких частот (в зоне резонанса гироскопа). Также преимуществом выбранной системы амортизации является обеспечение

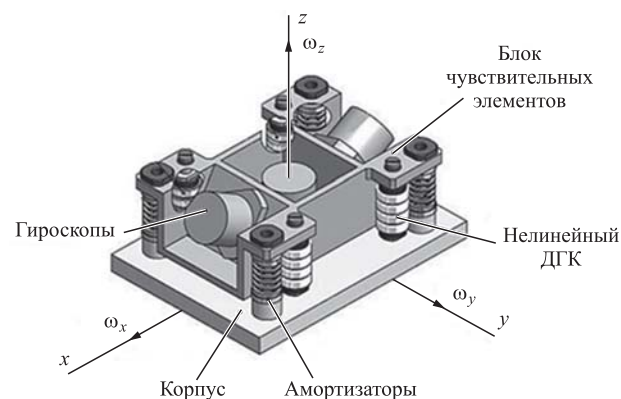


**Рис. 8. Значения амплитуды колебаний гироскопа в составе БЧЭ, амортизируемого с помощью стальных упругих элементов и ДГК с нелинейными характеристиками:**  $a$  — значения ускорений, возникающих в конструкции БЧЭ, амортизируемого предложенным способом;  $b$  — ускорение вибраций, действующих на корпус прибора;  $c$  — АЧХ системы амортизации (ось ординат  $|W(f)|$ ), где  $f_1$  — собственная частота системы амортизации;  $f_{\text{ДГК1}}$ ,  $f_{\text{ДГК2}}$  — характерные частоты работы ДГК;  $z$  — значения допустимого ускорения для гироскопа



**Рис. 9. Угловое положение объекта амортизации в эксплуатационном диапазоне вибраций:**

$a$ ,  $b$  — значение резонансной частоты упругого элемента 105, 150 и 170 Гц;  $c$  — максимальная допустимая угловая нестабильность положения



**Рис. 10. Конструктивная схема системы амортизации**

высокой стабильности углового положения чувствительных элементов (до 10") в течение назначенного ресурса работы прибора 15 лет, благодаря применению стальных амортизаторов, обладающих стабильными характеристиками при различных факторах эксплуатации.

### Библиографические ссылки

1. Сапожников И.Н., Неизвестных Ю.И., Духанин Н.Н. Приоритет — точность. М.: Изд-во РЕСТАРТ, 2006. 190 с.

2. Матвеев В.А., Подчерцев В.П., Фатеев В.В. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых гироскопах. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 103 с.

3. Новиков Л.З., Шаталов М.Ю. Механика динамически настраиваемых гироскопов. М.: Наука, 1985.

4. Магнус К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем / пер. с нем. М.: Мир, 1982. 304 с.

5. Топильская С.В., Бородулин Д.С., Корнюхин А.В. Экспериментальная оценка допустимых механических воздействий на динамически настраиваемый гироскоп // Вестник московского гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2018. № 4.

6. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин Н.Н., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. I. М.: Mashiz, 1956.

7. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.

8. **Вибрации** в технике: справочник. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. 456 с.

9. Тимошенко С.П., Янг Д., Уивер У. Колебания в инженерном деле / пер. с англ. Л.Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.

10. Пановко Я.Г. Присоединенные динамические системы как гасители колебаний. Прочность, устойчивость, колебания: справочник. Т. 3. М.: Машиностроение, 1968. С. 331—346.

11. Крендалл С. Случайные колебания. М.: Мир, 1967. 356 с.

12. Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А. Резиновые виброизоляторы: справочник. Л.: Судостроение, 1988. 216 с.

13. Семушкин О.Г. Механические испытания металлов: учеб. пособие для проф.-техн. училищ. М.: Высшая школа, 1972. 304 с.

14. Елисеев С.В., Нерубенко Г.П. Динамические гасители колебаний. Новосибирск: Наука, 1982. 144 с.

15. Корнев Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний. М.: Наука, 1988. 304 с.

16. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2005. 292 с.

### Ссылка для цитирования

Подчерцев В.П., Топильская С.В. Выбор конфигурации и параметров системы виброзащиты гироскопических измерителей угловой скорости // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 4. С. 187—192. DOI: 10.36652/0869-4931-2021-75-4-187-192.

### Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:  
«Пресса России» — индекс **27838**.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), на сайте [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru) (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 28.01.2021.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 23.03.2021.

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель