

ISSN 1727-2769

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 2 (63)
АПРЕЛЬ–ИЮНЬ
2024



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Журнал публикует статьи о новых конкретных результатах законченных оригинальных и особенно имеющих приоритетный характер исследований в области инноваций, а также в области физико-математических и технических наук по группам специальностей (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28.12.2018 № 90-р):

Физико-математические науки

- 1.3.8 – Физика конденсированного состояния
- 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

Технические науки

- 1.3.8 – Физика конденсированного состояния
- 1.3.11 – Физика полупроводников
- 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии
- 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16 – Радиолокация и радионавигация
- 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника
- 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Все рукописи рецензируются, по результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материалов. Для авторов публикация является бесплатной.

Редакция журнала «Доклады АН ВШ РФ» просит авторов при подготовке статей строго соблюдать правила, доступные по адресу <http://journals.nstu.ru/doklady/rules>. Статьи, оформленные с нарушением правил, отклоняются без рецензирования.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

2024

апрель – июнь

№ 2 (63)

Выходит четыре раза в год

ISSN 1727-2769

Учредитель

Новосибирский государственный технический университет

Главный редактор

А.Г. Вострецов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ

Заместитель главного редактора

В.Н. Васюков, д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет

М. Грайцар, PhD, проф. (Словакия)

Д.В. Винников, д-р техн. наук, проф. (Эстония)

А. Загоскин, PhD (Великобритания)

Е.В. Ильичев, д-р физ.-мат. наук, проф. (Германия)

М.Н. Клымаш, д-р техн. наук, проф. (Украина)

К.Ю. Арутюнов, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.В. Бурдаков, д-р физ.-мат. наук, проф.

И.С. Грузман, д-р техн. наук, проф.

А.О. Давидов, д-р техн. наук

Г.Н. Девятков, д-р техн. наук, проф.

В.П. Драгунов, д-р техн. наук, доц.

С.Л. Елистратов, д-р техн. наук

А.И. Легалов, д-р техн. наук, проф.

И.Ф. Лозовский, д-р техн. наук, проф.

В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, проф.

М.И. Низовцев, д-р техн. наук, проф.

О.В. Нос, д-р техн. наук, проф.

В.П. Разинкин, д-р техн. наук, проф.

В.Я. Рудяк, д-р физ.-мат. наук, проф.

А.А. Спектор, д-р техн. наук, проф.

А.Н. Сычев, д-р техн. наук, проф.

С.П. Халютин, д-р техн. наук, проф.

С.А. Харитонов, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Юркевич, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Д.О. Соколова, канд. техн. наук

*Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций в 2021 г.
(свидетельство ПИ № ФС 77-81374 от 30.06.2021 г.)*

Адрес редакции, издателя: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ, корп. 1, ком. 346,
телефон: (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Новосибирский государственный технический университет, 2024 г.

SCIENTIFIC JOURNAL

**PROCEEDINGS
OF THE RUSSIAN HIGHER SCHOOL
ACADEMY OF SCIENCES**

2024

April – June

№ 2 (63)

Journal is published quarterly

ISSN 1727-2769

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Chief Editor

A.G. Vostretsov, D.Sc. (Eng.), Prof., Honoured Science Worker of Russian Federation

Deputy Chief Editor

V.N. Vasyukov, D.Sc. (Eng.), Prof.

Editorial Council

M. Grajcar, PhD, Prof. (Slovakia)
D.V. Vinnikov, D.Sc. (Eng.), Prof. (Estonia)
A.M. Zagoskin, PhD (United Kingdom)
E.V. Ilyichev, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof. (Germany)
M.M. Klymash, D.Sc. (Eng.), Prof. (Ukraine)
K.Yu. Arutyunov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.V. Burdakov, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
I.S. Gruzman, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.O. Davidov, D.Sc. (Eng.)
G.N. Devyatkov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Dragunov, D.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S.L. Elistratov, D.Sc. (Eng.)
A.I. Legalov, D.Sc. (Eng.), Prof.
I.F. Lozovskiy, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Yu. Neyman, D.Sc. (Eng.), Prof.
M.I. Nizovtsev, D.Sc. (Eng.), Prof.
O.V. Nos, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.P. Razinkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.Ya. Rudyak, D.Sc. (Phys.&Math.), Prof.
A.A. Spector, D.Sc. (Eng.), Prof.
A.N. Sychev, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.P. Khaljutin, D.Sc. (Eng.), Prof.
S.A. Haritonov, D.Sc. (Eng.), Prof.
V.D. Yurkevich, D.Sc. (Eng.), Prof.

Executive Secretary

D.O. Sokolova, C.Sc.(Eng.)

Editor and Publisher Address: Office 346, 20 bld. 1, K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073,
Russian Federation. Tel: +7 (383) 315-39-42. E-mail: danvshrf@corp.nstu.ru

© Novosibirsk State Technical University, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Андрянов А.И.

К выбору параметров регулятора непосредственного
понижающего преобразователя с одноконтурной системой
управления с учетом динамических нелинейностей7

Бутаков Е.Б., Абдуракипов С.С.

Применение методов машинного обучения для диагностики
и управления режимами сжигания угольной пыли.....24

Енученко М.С., Квашина Н.В., Пилипко М.М.

Анализ влияния отклонений на нелинейность в гибридном
РС-ЦАП32

Киселев А.В., Таюров А.В.

Соотношения для оценки ошибок установки углового
положения в матричных имитаторах радиоэлектронной
обстановки43

Манжос Е.В., Коржавин А.А.

Исследование инициирования волны фильтрационного
горения газа открытым пламенем.....54

Мухина М.А., Садкин И.С., Шадрин Е.Ю., Копьев Е.П.

Экспериментальное исследование влияния температуры
распылителя на характеристики сжигания дизельного топлива
в атмосферном горелочном устройстве67

CONTENTS

TECHNICAL SCIENCES

Andriyanov A.I.

On the selection of parameters for the controller in a single loop control system for a direct DC-to-DC buck converter with respect to dynamic nonlinearity7

Butakov E.B., Abdurakipov S.S.

Application of machine learning methods for diagnostics and control of coal dust combustion modes24

Yenuchenko M.S., Kvashina N.V., Pilipko M.M.

Analysis of the effect of mismatch on nonlinearity in hybrid RC-DAC.....32

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Ratios for estimating errors in setting the angular position
in matrix simulators of an electronic environment.....43

Manzhos E.V., Korzhavin A.A.

Study of initiation of gas filtration combustion wave by
an open flame54

Mukhina M.A., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P.

Experimental study of the effect of sprayer temperature on the
characteristics of diesel fuel combustion in an atmospheric burner
device67

УДК 621.314

**К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА НЕПОСРЕДСТВЕННОГО
ПОНИЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ОДНОКОНТУРНОЙ
СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ
НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ****А.И. Андриянов***Брянский государственный технический университет*

Статья посвящена вопросам выбора параметров пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора одноконтурной системы управления с непосредственным понижающим преобразователем напряжения с учетом динамических нелинейностей. Данная задача возникает при необходимости проектирования импульсных преобразователей напряжения с повышенным быстродействием, когда приходится повышать частоту среза разомкнутого контура управления без возможности повышения несущей частоты широтно-импульсной модуляции из-за ограничений элементной базы, что приводит в ряде случаев к появлению нелинейных эффектов. Это требуется учитывать при выборе как частоты среза разомкнутого контура, так и запаса устойчивости. В статье предложена нелинейная динамическая модель непосредственного понижающего преобразователя с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором как в форме кусочно-гладкой системы дифференциальных уравнений, так и форме отображения Пуанкаре. Предлагается методика выбора параметров регулятора при заданной частоте среза разомкнутого контура и заданном запасе устойчивости, а также заданных диапазонах изменения входного напряжения и сопротивления нагрузки, базирующаяся на применении численных методов решения систем нелинейных уравнений с заданными ограничениями. Исследована нелинейная динамика системы при различных наборах параметров регулятора. Показано, что при увеличении частоты среза и малых запасах устойчивости в системе могут возникнуть нежелательные динамические режимы при падении емкости фильтра в пределах расчетных значений, в то время как линейные динамические модели показывают устойчивость системы. Для устранения возможности появления нежелательных режимов необходимо повышать запас устойчивости с последующим контролем результатов с применением нелинейной динамической модели. Предлагаемая методика выбора частоты среза разомкнутого контура и запаса устойчивости по фазе, базирующаяся на анализе нелинейной динамики, позволяет проектировать источники питания с повышенным быстродействием.

Ключевые слова: непосредственный понижающий преобразователь напряжения, источник питания, система управления, пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, замкнутая система, запас устойчивости, нелинейная динамика.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-7-23

Введение

Импульсные стабилизированные источники питания (ИСИП) строятся как системы с отрицательной обратной связью по выходному напряжению с целью его стабилизации в условиях воздействия внешних возмущений. При этом наиболее значимыми возмущениями являются изменение входного напряжения и сопротивления нагрузки [1–6]. Такой подход к построению ИСИП является традиционным и давно применяется при их проектировании.

Основной задачей при разработке ИСИП является расчет контура стабилизации выходного напряжения, при котором основным критерием является обеспечение устойчивости системы в рабочей точке [1–6]. При этом внимание обраща-

ется на обеспечение запаса устойчивости по фазе. Также в ряде случаев требуется обеспечить и заданную быстроту реакции системы управления на изменение внешних возмущений с целью скорейшего восстановления заданного значения выходного напряжения после переходных процессов.

Желаемые показатели контура стабилизации выходного напряжения достигаются введением последовательной коррекции контура, т. е. последовательно с объектом управления включается регулятор того или иного типа. В этом случае расчет контура стабилизации сводится к выбору его параметров.

При расчете регулятора, как правило, используются малосигнальные модели объекта управления (в данном случае импульсного преобразователя напряжения), который в общем случае демонстрирует нелинейность [7, 8]. Здесь в малой окрестности рабочей точки производится линеаризация системы с последующим построением малосигнальных передаточных функций объекта управления. Это позволяет использовать при выборе параметров регулятора методы теории линейных систем автоматического управления (например, частотный метод Найквиста [9]). Такой подход в большинстве случаев дает приемлемые результаты проектирования. При этом существующие методики [3, 6, 10], как правило, ориентированы на выбор оптимального расположения нулей и полюсов передаточной функции регулятора с целью формирования желаемой передаточной функции разомкнутого контура. Основные параметры желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) разомкнутого контура, как правило, подбираются на основе известных рекомендаций [3].

1. Средний наклон ЛАЧХ разомкнутой системы должен быть -20 дБ/дек (особенно на частоте среза).

2. Частота среза должна быть как можно более высокой с целью повышения быстродействия (по рекомендациям она должна быть в 5–10 раз меньше несущей частоты широтно-импульсной модуляции).

3. Запас устойчивости по фазе должен быть достаточен для обеспечения устойчивости системы при дрейфе ее параметров в определенных пределах.

Наиболее критическим показателем является частота среза, поскольку именно она определяет быстродействие системы. Также важен и запас устойчивости по фазе, поскольку его избыточность может повлиять на качество переходных процессов при воздействии внешних возмущений, а недостаток может привести к потере устойчивости.

Приведенные в существующей литературе [3, 6, 10] рекомендации по выбору частоты среза и запаса устойчивости по фазе можно отнести скорее к источникам питания общего назначения, к которым не предъявляются повышенные требования к быстродействию. Кроме того, в литературе как правило не указывается, на основе каких четких критериев сформированы рекомендации по выбору частоты среза и как можно корректировать указанные критерии с целью достижения требуемых целевых показателей системы стабилизации выходного напряжения.

В данной работе будет изучена динамика одноконтурной системы стабилизации напряжения на основе непосредственного понижающего преобразователя постоянного напряжения с пропорционально-интегрально-дифференцирующим (ПИД) регулятором [6, 11] с использованием нелинейной динамической модели системы. Особенность данного типа регулятора заключается в том, что его применение позволяет расширить полосу пропускания системы автоматического управления по сравнению с полосой пропускания объекта управления [6], что важно при построении быстродействующих ИСИП. Это обусловлено большим количеством параметров регулятора, доступных для настройки.

Обширные исследования непосредственного понижающего преобразователя напряжения с данным типом регулятора с точки зрения теории нелинейных динамических систем ранее не проводились. Наиболее близкой является работа [6], где верификация результатов, полученных с применением традиционных линейных малосигнальных моделей, производилась на основе малосигнальных частотных характеристик разомкнутого контура, снятых на нелинейной импульсной модели методом замкнутого контура, что тоже имеет свои ограничения с точки зрения точности результатов. В [6] эмпирически показано, что проблемы с устойчивостью системы полностью исчезают при выборе частоты среза разомкнутого контура в примерно 10 раз меньше частоты ШИМ, но даже в этом случае рекомендуется проверять результаты на нелинейной модели с использованием метода замкнутого контура.

Нелинейная динамика ИСИП активно изучается с 80-х годов прошлого века за рубежом [12] и в нашей стране [7, 8]. На данный момент получен достаточный теоретический опыт для расширения практического внедрения полученных результатов. Основной проблемой применения нелинейных динамических моделей является их сложность и неудобство при инженерном проектировании, но в связи с развитием вычислительной техники эта проблема постепенно уходит.

Актуальность данной работы обуславливается тем, что нелинейная динамическая модель учитывает возможность возникновения в импульсных преобразователях напряжения нелинейных колебаний с повышенной амплитудой [7, 8]. Как было показано ранее [13], такие колебания как правило возникают при уменьшении запаса устойчивости по фазе, а также при приближении частоты среза разомкнутого контура к несущей частоте широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в условиях дрейфа параметров системы или величин внешних воздействий. Именно эти особенности делают актуальным при выборе запаса устойчивости и частоты среза учет возможности возникновения нелинейных эффектов в импульсных системах стабилизации напряжения. В то же время стоит отметить, что повышение частоты среза с целью повышения быстродействия можно проводить, одновременно повышая несущую частоту ШИМ, что исключает указанные проблемы, но в ряде случаев из-за ограничений компонентной базы это сделать невозможно. Именно такое случаем рассматривается в данной работе.

1. Математические модели импульсного источника питания

В данном разделе будут рассмотрены нелинейная динамическая и малосигнальные модели ИСИП, которые будут использованы в дальнейшем.

На рис. 1 представлена схема замещения импульсного преобразователя напряжения, учитывающая паразитные параметры отдельных компонентов системы.

Непосредственный преобразователь напряжения состоит из силового транзистора VT , силового диода VD , дросселя D с индуктивностью L и активным сопротивлением R_L , конденсатора КОН с емкостью C и последовательным сопротивлением R_C . Нагрузка преобразователя активная и представлена на рис. 1 сопротивлением R_H . На вход преобразователя поступает постоянное напряжение $u_{вх}$.

Сигнал обратной связи $u_{ос}$ формируется с помощью усилителя сигнала обратной связи УОС и поступает на инвертирующий вход усилителя ошибки, реализованного на основе операционного усилителя ОУ и компонентов C_1 , C_2 , C_3 , R_1 , R_2 , R_3 , определяющих параметры регулятора. Также в схеме замещения учтены

сопротивления утечки конденсаторов $C_i R_{LCi} = R_{LC}$, где $i = 1, 2, 3$, которые не оказывают существенного влияния на работу схемы, но их учет позволяет избежать появления сингулярных матриц в математической модели системы.

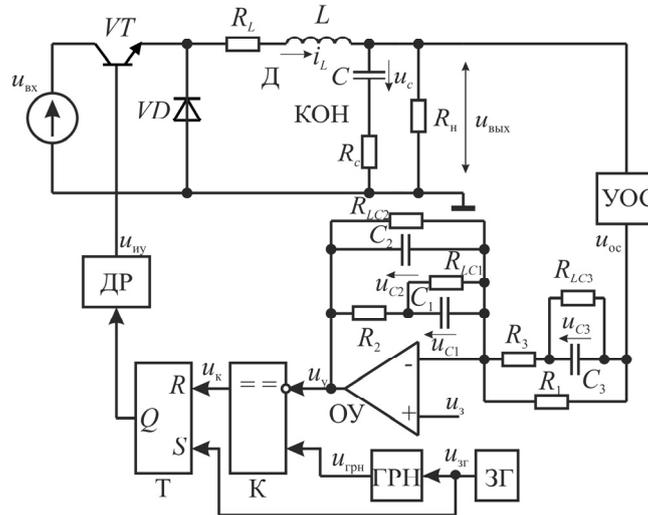


Рис. 1 – Схема замещения импульсного стабилизированного источника питания

Fig. 1 – Equivalent circuit of the switching stabilized power supply

На неинвертирующий вход усилителя ошибки поступает сигнал задания u_3 , определяющий величину выходного напряжения.

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид [5]

$$W_p(p) = -\frac{u_y(p)}{u_{oc}(p)} = \frac{K_{yo}(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}{p(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}, \quad (1)$$

где $\tau_1 = R_2 C_1$, $\tau_2 = (R_1 + R_3) C_3$, $T_1 = C_1 C_2 R_2 / (C_1 + C_2)$, $T_2 = R_3 C_3$, $K_{yo} = 1 / (R_1 (C_1 + C_2))$.

Выходной сигнал регулятора u_y поступает на инвертирующий вход ШИМ-компаратора К, на неинвертирующий вход которого поступает пилообразное напряжение $u_{грн}$ с выхода генератора развертывающего напряжения ГРН, тактируемого сигналом $u_{зг}$ от задающего генератора ЗГ. Чем больше сигнал управления u_y , тем больше ширина импульсов на выходе драйвера ДР $u_{упу}$, что соответствует ШИМ. Триггер Т исключает скользкие режимы работы импульсного модулятора, т. е. обеспечивает только одну коммутацию силового ключа на тактовом интервале. В начале тактового интервала по сигналу от задающего генератора ЗГ триггер устанавливается в единичное состояние, что приводит к отпиранию силового ключа, а по единичному сигналу с компаратора $u_к$ триггер Т сбрасывается.

Таким образом, изменяя длительность интервала открытого состояния силового ключа, дозируется энергия, передаваемая в нагрузку. Выходное напряжение преобразователя в этом случае определяется по выражению

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} \gamma,$$

где $\gamma = t_{\text{и}} / T$, $t_{\text{и}}$ – длительность импульса управления $u_{\text{иу}}$; T – период ШИМ.

При рассмотрении принципа действия непосредственного понижающего преобразователя напряжения в пределах k -го тактового интервала ШИМ выделяют три участка постоянства структуры силовой части.

1. Участок $(k-1)T \leq t < t_{k1}$, где t_{k1} – момент коммутации силового ключа. На данном участке силовой ключ VT открыт и на вход LC -фильтра поступает напряжение, что ведет к передаче энергии от входа к выходу.

2. Участок $t_{k1} \leq t < t_{k2}$, где t_{k2} – момент коммутации силового диода. На данном участке силовой ключ закрыт и открыт силовой диод VD . В этом случае на входе LC -фильтра наблюдается нулевое напряжение. Ток дросселя фильтра замыкается через диод VD .

3. Участок $t_{k2} \leq t < kT$. На данном участке силовой ключ и силовой диод закрыты. Данный участок появляется в режиме прерывистого тока.

Более подробное описание работы преобразователя приведено в [1–3].

Математическая модель систем рассматриваемого класса является кусочно-гладкой [7, 8], т. е. на i -м участке постоянства структуры силовой части (участке гладкости) движения описываются системой линейных дифференциальных уравнений с приспособыванием при переходе от участка к участку. Она имеет вид

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}_i \mathbf{X} + \mathbf{B}_i \mathbf{v}_i, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3$; \mathbf{A}_i – системная матрица на i -м участке гладкости; \mathbf{B}_i – матрица управления на i -м участке гладкости; \mathbf{v}_i – вектор управляющих воздействий; $\mathbf{X} = (i_L, u_c, u_{c1}, u_{c2}, u_{c3})^T$ – вектор переменных состояния (рис. 1); i_L – ток дросселя; u_c – напряжение на конденсаторе; u_{cj} – напряжение на конденсаторе C_j , где $j = 1, 2, 3$.

Описание динамики силовой части непосредственного понижающего преобразователя широко известно и имеет вид [4]

$$\frac{di_L}{dt} = \begin{cases} -\frac{R_L + R_H \parallel R_c}{L} i_L - \frac{R_L}{(R + R_c)L} u_c + \frac{u_{\text{вх}}}{L} & \text{на участке 1;} \\ -\frac{R_L + R_H \parallel R_c}{L} i_L - \frac{R_L}{(R + R_c)L} u_c & \text{на участке 2;} \\ 0 & \text{на участке 3;} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{du_c}{dt} = \begin{cases} \frac{R}{(R_H + R_c)C} i_L - \frac{1}{(R_H + R_c)C} u_c & \text{на участках 1, 2;} \\ -\frac{1}{(R_H + R_c)C} u_c & \text{на участке 3.} \end{cases}$$

Выражение для расчета выходного напряжения непосредственного понижающего преобразователя имеет вид [4]

$$u_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} \frac{R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} u_{\text{C}} + (R_{\text{H}} \parallel R_{\text{C}}) i_{\text{L}} & \text{на участках 1, 2;} \\ \frac{R_{\text{H}}}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} u_{\text{C}} & \text{на участке 3.} \end{cases} \quad (4)$$

При этом стоит заметить (рис. 1), что

$$u_{\text{OC}} = \beta u_{\text{ВЫХ}}. \quad (5)$$

На следующем этапе получим математическое описание регулятора в форме дифференциальных уравнений. На основании анализа рис. 1 имеем

$$\begin{aligned} u_{\text{OC}} - u_3 &= R_3 \left(C_3 \frac{du_{\text{C3}}}{dt} + \frac{u_{\text{C3}}}{R_{\text{LC}}} \right) + u_{\text{C3}}; \\ R_2 \left(C_1 \frac{du_{\text{C1}}}{dt} + \frac{u_{\text{C1}}}{R_{\text{LC}}} \right) + u_{\text{C1}} &= u_{\text{C2}}; \\ C_3 \frac{du_{\text{C3}}}{dt} + \frac{u_{\text{OC}} - u_3}{R_1} + \frac{u_{\text{C3}}}{R_{\text{LC}}} &= C_2 \frac{du_{\text{C2}}}{dt} + \frac{u_{\text{C2}}}{R_{\text{LC}}} + C_1 \frac{du_{\text{C1}}}{dt} + \frac{u_{\text{C1}}}{R_{\text{LC}}}. \end{aligned}$$

Приведем данную систему к каноническому виду с учетом (4), (5), имеем

$$\begin{aligned} \frac{du_{\text{C1}}}{dt} &= \left(-\frac{1}{R_2 C_1} - \frac{1}{C_1 R_{\text{LC}}} \right) u_{\text{C1}} + \frac{1}{R_2 C_1} u_{\text{C2}}; \\ \frac{du_{\text{C2}}}{dt} &= \begin{cases} \frac{u_{\text{C1}}}{R_2 C_2} - \frac{(R_2 + R_{\text{LC}})}{C_2 R_2 R_{\text{LC}}} u_{\text{C2}} - \frac{u_{\text{C3}}}{C_2 R_3} + \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3 C_2} \frac{R_{\text{H}} \beta}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} u_{\text{C}} + \\ + \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3 C_2} \frac{R_{\text{H}} R_{\text{C}} \beta}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} i_{\text{L}} - \left(\frac{1}{C_2 R_1} + \frac{1}{C_2 R_3} \right) u_3 & \text{на участках 1, 2;} \\ \frac{u_{\text{C1}}}{R_2 C_2} - \frac{(R_2 + R_{\text{LC}})}{C_2 R_2 R_{\text{LC}}} u_{\text{C2}} - \frac{u_{\text{C3}}}{C_2 R_3} + \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_3 C_2} \frac{R_{\text{H}} \beta}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} u_{\text{C}} - \\ - \left(\frac{1}{C_2 R_1} + \frac{1}{C_2 R_3} \right) u_3 & \text{на участке 3;} \end{cases} \quad (6) \\ \frac{du_{\text{C3}}}{dt} &= \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{C_3 R_{\text{LC}}} \right) u_{\text{C3}} + \frac{1}{R_3 C_3} \frac{R_{\text{H}} \beta}{R_{\text{H}} + R_{\text{C}}} u_{\text{C}} - \frac{u_3}{R_3 C_3}. \end{aligned}$$

Матрицы \mathbf{A}_i , \mathbf{B}_i и вектора \mathbf{v}_i могут быть получены из (3) и (6).

Основным режимом работы импульсных преобразователей напряжения является периодический режим, поэтому для их анализа целесообразно использовать метод точечных отображений [8]. В этом случае от систем дифференциальных уравнений (2) осуществляют переход к отображению Пуанкаре, которое для базовых импульсных преобразователей постоянного напряжения универсально и имеет вид [13]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k = \Psi(\mathbf{X}_{k-1}) = & e^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} e^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} e^{\mathbf{A}_1 z_{k1} a} \mathbf{X}_{k-1} + \\ & + e^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} e^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} (e^{\mathbf{A}_3 z_{k1} a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB1} + \\ & + e^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} [e^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} - \mathbf{E}] \mathbf{V}_{AB2} + (e^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB3}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\mathbf{V}_{ABi} = \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i$; \mathbf{E} – единичная матрица; $z_{ki} = (t_{ki} - (k-1)T)/T$ – моменты коммутации в пределах тактового k -го интервала в относительном времени.

Очевидно, что выражение (7) связывает вектор переменных \mathbf{X}_{k-1} состояния в начале k -го интервала с вектором переменных состояния в конце k -го тактового интервала \mathbf{X}_k . С точки зрения метода точечных отображения анализируется устойчивость неподвижных точек периодических режимов [7, 8], а не состояний равновесия, как при линейном подходе.

При выполнении итераций по выражению (7) на каждой итерации необходимо рассчитывать z_{k1} и z_{k2} . Момент z_{k1} определяется по факту пересечения сигнала u_y и развертывающего пилообразного сигнала $u_{грн}$. При этом сигнал управления (рис. 1) $u_y = u_3 - u_{c2}$. Таким образом, z_{k1} находится из трансцендентного уравнения

$$\xi_{k1}(\mathbf{X}, z_{k1}) = 0,$$

где $\xi_{k1}(\mathbf{X}, z_{k1}) = u_3 - \mathbf{c}_1 (e^{\mathbf{A}_1 z_{k1} a} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{\mathbf{A}_1 z_{k1} a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB1}) - u_{грн,m} z_{k1}$ – переключающая функция, $\mathbf{c}_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ – вектор-строка выборки u_{c2} из вектора переменных состояния \mathbf{X} ; $u_{грн,m}$ – амплитуда развертывающего напряжения.

Момент z_{k2} определяется по факту пересечения токком дросселя i_L нуля и также определяется на основании трансцендентного уравнения при известном z_{k1} :

$$\xi_{k2}(\mathbf{X}, z_{k2}) = 0,$$

где $\xi_{k2}(\mathbf{X}, z_{k2}) = c_2 (e^{\mathbf{A}_2 z_{k2} a} (e^{\mathbf{A}_1 z_{k1} a} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{\mathbf{A}_1 z_{k1} a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB1}) + (e^{\mathbf{A}_2 z_{k2} a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB2})$, $\mathbf{c}_2 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ – вектор-строка выборки i_L из вектора переменных состояния \mathbf{X} .

Далее приведем математическую модель преобразователя в форме малосигнальной передаточной функции [1]:

$$W_{п}(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{u_y(p)} = \frac{K(\tau_c p + 1)}{T_{\phi}^2 p^2 + 2\xi T_{\phi} p + 1}, \quad (8)$$

где $T_{\phi} = \sqrt{\frac{LC(R_H + R_c)}{R_L + R_H}}$; $\xi = \frac{L + C[R_L(R_c + R_H) + R_c R_H]}{2\sqrt{LC(R_c + R_H)(R_L + R_H)}}$; $K = \frac{R_H}{R_L + R_H} \frac{u_{\text{вх}}}{U_{грн,m}}$, $\tau_c = R_c C$.

2. Расчет параметров импульсного источника питания

В данном разделе приведены методики расчета параметров силового фильтра преобразователя и регулятора, поскольку последние напрямую влияют на динамику системы.

Для расчета силового фильтра будет применена известная методика [14].
Произведение LC рассчитывается по выражению.

$$LC = \frac{U_{\text{вх max}}(1 - \gamma_{\text{min}})\gamma_{\text{min}}}{16f_{\text{ШИМ}}\Delta U_{\text{вых}}}, \quad (9)$$

где $U_{\text{вх max}}$ – максимальное входное напряжение; γ_{min} – минимальное значение коэффициента заполнения; $\Delta U_{\text{вых}}$ – допустимая амплитуда пульсаций выходного напряжения.

Индуктивность дросселя рассчитывается по выражению

$$L = \frac{U_{\text{вх max}}(1 - \gamma_{\text{min}})\gamma_{\text{min}}}{2f_{\text{ШИМ}}I_{\text{н min}}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{н min}} = P_{\text{н min}} / U_{\text{вых}}$, $P_{\text{н min}}$ – минимальная мощность нагрузки.

Очевидно, что значения L и C , полученные на основании (9) и (10), требуется увеличить на некоторую величину для обеспечения надежности работы преобразователя. В частности выражение (9) дает значение индуктивности дросселя на границе прерывистого тока при минимальном токе нагрузки, что в принципе допустимо, но требуется определенный запас. При расчете емкости по указанной методике не учитываются дополнительные пульсации выходного напряжения из-за паразитного последовательного сопротивления конденсатора и технологический разброс номиналов конденсаторов, который может быть большим при использовании электролитических конденсаторов. Так что емкость тоже нужно увеличить относительно расчетной.

Расчет параметров регулятора осуществляется исходя из необходимости получения ЛАЧХ разомкнутого контура наиболее близкой к желаемой. В [3, 6] представлена методика выбора параметров регулятора, которая связана с определенным размещением нулей и полюсов регулятора. На рис. 2 представлены ЛАЧХ и фазочастотная характеристика (ФЧХ), позволяющие понять принцип выбора положения нулей и полюсов. Как видно из рисунка, частоты нулей регулятора ω_{ez1} и ω_{ez2} располагаются таким образом, чтобы изгиб ЛАЧХ регулятора хотя бы частично компенсировал выброс ЛАЧХ преобразователя на резонансной частоте $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$. Частота первого полюса ω_{ep1} располагается выше частоты среза, чтобы подъем ЛАЧХ регулятора на участке $(\omega_{ez2}, \omega_{ep1})$ обеспечил наклон ЛАЧХ разомкнутого контура скорректированной системы на уровне -20 дБ/дек.

Частота второго полюса принимается равной частоте, обусловленной паразитным сопротивлением конденсатора $\omega_{esr} = 1/R_c C$. При этом в [3] даны рекомендуемые диапазоны частот, к которым должны принадлежать частоты ω_{ez1} , ω_{ez2} , ω_{ep1} . При этом указанные диапазоны для f_{ez1} и f_{ez2} лежат вблизи ω_p , а диапазон для ω_{ep1} лежит вблизи частоты среза ЛАЧХ разомкнутой системы ω_{x0} . Очевидно, что такой подход позволят достичь приемлемых показателей качества системы автоматического управления, но при этом не позволяет с заданной точностью обеспечить требуемый запас устойчивости по фазе, что делает его несколько непредсказуемым (запас устойчивости уже проверяется по факту распределения нулей и полюсов, а не является исходным данным). Альтернативным

подходом является использованием методики, упомянутой в [6], которая на основе аналитических выражений при заданной частоте среза разомкнутого контура и запаса устойчивости по фазе позволяет выбрать параметры регулятора, но при этом существенно сужает диапазон задаваемой перед началом расчета частоты среза, что в данной работе недопустимо.

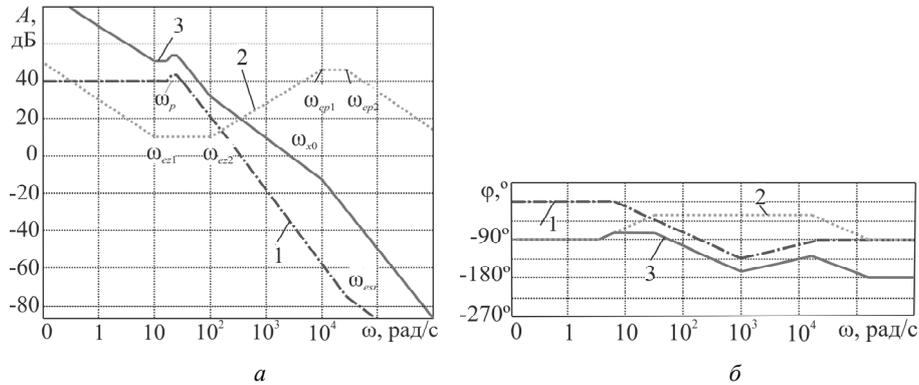


Рис. 2 – Частотные характеристики (1 – преобразователь, 2 – регулятор, 3 – скорректированная система):
 а – ЛАЧХ; б – ФЧХ

Fig. 2 – Bode plot (1 is a converter, 2 is a regulator, 3 is an adjusted system):
 a is a Bode magnitude plot; b is a Bode phase plot

Для обеспечения предсказуемости получаемого запаса устойчивости по фазе при использовании методики с размещением нулей и полюсов регулятора предлагается применять численные методы, потому что аналитически это сделать в силу специфики математического описания системы затруднительно.

Для расчета регулятора составим систему уравнений с заданными ограничениями. Для начала введем две функции:

$$f_A(\omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}, \omega) = 20 \log \left(\left| W_{\text{рег}}(j\omega, \omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}) W_{\text{п}}(j\omega) \beta \right| \right);$$

$$f_{\phi}(\omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}, \omega) = \arg \left(W_{\text{рег}}(j\omega, \omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}) W_{\text{п}}(j\omega) \beta \right),$$

где передаточная функция регулятора на основе (1) имеет вид

$$W_{\text{рег}}(p, \omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}) = \frac{K_{\text{yo}} \left(1 + \frac{1}{\omega_{ez1}} p \right) \left(1 + \frac{1}{\omega_{ez2}} p \right)}{p \left(1 + \frac{1}{\omega_{ep1}} p \right) \left(1 + \frac{1}{\omega_{ep2}} p \right)}.$$

Функция f_A представляет собой зависимость коэффициента передачи разомкнутого контура, выраженного в децибелах от частоты ω , а функция f_{ϕ} представляет собой зависимость сдвига фазы разомкнутого контура, выраженного в градусах от частоты ω . Также параметрами указанных функций являются частоты нулей и полюсов регулятора, которые требуется найти.

Далее составляем систему уравнений с ограничениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_A(\omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}, \omega_{x0}) = 0; \\ f_\varphi(\omega_{ez1}, \omega_{ez2}, \omega_{ep1}, \omega_{x0}) = -180 + \varphi_{\text{зап}}; \\ \omega_{ez2} > \omega_{ez1} > 0,5\omega_p; \\ \omega_{ez1} < \omega_{ep1}; \\ \omega_{ez2} > 1\omega_p; \\ \omega_{ep1} > 3\omega_{x0}. \end{array} \right. \quad (11)$$

Логика введенных ограничений качественно объясняется рис. 2. При этом коэффициенты 0,5, 3 и 1 в (11) являются лишь рекомендацией и в частных случаях могут быть изменены на более оптимальные. Данная система решается с помощью численных методов и позволяет однозначно обеспечить заданную частоту среза ω_{x0} и запас устойчивости по фазе $\varphi_{\text{зап}}$.

При расчете регулятора в условиях изменения входного напряжения и сопротивления нагрузки в широком диапазоне от $u_{\text{вх min}}$ до $u_{\text{вх max}}$ и от $R_{\text{н min}}$ до $R_{\text{н max}}$ необходимо решить вопрос о том, при каких значениях указанных параметров нужно вести расчет с использованием (11). Для этого выполним анализ передаточной функции (8). Здесь необходимо определить, как влияют указанные параметры на частоту среза и сдвиг фазы разомкнутого контура вблизи частоты среза. Очевидно, что дрейф входного напряжения и сопротивления нагрузки не должен приводить к повышению частоты среза ω_{x0} выше заданной, а сдвиг фазы не должен приблизиться к -180° , уменьшая тем самым запас устойчивости меньше заданного.

Как следует из (8), от входного напряжения прямо пропорционально зависит только коэффициент K , т. е. увеличение $u_{\text{вх}}$ ведет к подъему ЛАЧХ и, соответственно, к увеличению частоты среза, что нежелательно, поскольку приближает ее к частоте ШИМ. Таким образом, очевидно, что расчет регулятора необходимо вести при $u_{\text{вх max}}$, что является наихудшим случаем, поскольку при снижении напряжения f_{x0} будет только уменьшаться. Также стоит заметить, что коэффициент K , а следовательно, и $u_{\text{вх}}$ не влияет на сдвиг фазы разомкнутого контура.

Оценить влияние значения сопротивления нагрузки на сдвиг фазы разомкнутого контура можно, анализируя коэффициент демпфирования ξ в (8). Как известно из теории линейных систем управления, чем меньше коэффициент ξ в передаточной функции второго порядка, тем резче спадает фаза вблизи резонансной частоты f_p [9] и тем меньше будет запас по фазе разомкнутого контура. Как следует из (8), знаменатель выражения для ξ содержит слагаемое, соответствующее квадрату сопротивления нагрузки. Это говорит о том, что при росте этого сопротивления знаменатель будет расти быстрее числителя, т. е. сдвиг фазы будет приближаться к -180° и, следовательно, будет падать запас устойчивости. Таким образом, расчет регулятора следует вести при максимальном сопротивлении нагрузки $R_{\text{н max}}$.

Рассмотренная выше методика выбора параметров регулятора будет применена в дальнейшем.

3. Анализ динамики импульсного источника питания

В данном разделе исследована динамика импульсного преобразователя напряжения в условиях изменяющихся параметров системы. Рассматривается непосредственный понижающий преобразователь напряжения с ПИД-регулятором, имеющий следующие характеристики: входное напряжение $u_{вх\ min} = 12$ В, $u_{вх\ max} = 30$ В, выходное напряжение $u_{вых} = 5$ В, мощность нагрузки $P_{н\ min} = 3$ Вт, $P_{н\ max} = 20$ Вт, несущая частота ШИМ $f_{шим} = 100$ кГц ($\omega_{шим} = 628\ 000$ рад/с), требуемый коэффициент пульсаций выходного напряжения $K_{п} = 1\ %$, коэффициент обратной связи $\beta = 1$, размах переменной составляющей пилообразного развертывающего напряжения $U_{гн\ m} = 3$ В. На основе выражений (9) и (10) с учетом сделанного запаса $L = 40$ мкГн, $R_L = 0,005$ Ом, $C = 40$ мкФ, $R_c = 5$ мОм. При этом индуктивность была увеличена на 20 % относительно расчетной (33 мкГн), а емкость на 100 % относительно расчетной (20 мкФ).

На основе (11) были получены параметры регулятора при различных исходных данных, а именно частоты среза $\omega_{х0}$ и запаса устойчивости $\varphi_{зап}$ (см. таблицу). При этом $R_{LC} = 6 \cdot 10^8$ Ом.

Результаты расчета регулятора

Regulator calculation results

Частота среза, рад/с	Запас устойчивости, град	$\tau_1, с$	$\tau_2, с$	$T_1, с$	$T_2, с$	Относительная площадь области нежелательных режимов, %
60000	20	0,00008	0,000175	0,000055	0,000002	0
60000	30	0,000517	0,000321	0,000055	0,000002	0
60000	40	0,000765	0,000392	0,000055	0,000002	0
60000	50	0,000800	0,000397	0,000027	0,000002	0
120000	20	0,000800	0,000074	0,000026	0,000002	0
120000	30	0,000800	0,000106	0,000026	0,000002	0
120000	40	0,000800	0,000160	0,000027	0,000002	0
120000	50	0,000588	0,000340	0,000028	0,000002	0
170000	20	0,000779	0,000052	0,000020	0,000002	6,2
170000	30	0,000800	0,000067	0,000017	0,000002	1,0
170000	40	0,000800	0,000107	0,000019	0,000002	0,363
170000	50	0,000426	0,000279	0,000019	0,000002	0
200000	20	0,000712	0,000044	0,000017	0,000002	35,52
200000	30	0,000800	0,000056	0,000014	0,000002	15,05
200000	40	0,000800	0,000085	0,000015	0,000002	7,43
200000	50	0,000800	0,000141	0,000016	0,000002	0

Для анализа динамики системы на рис. 3 приведены двухпараметрические диаграммы, построенные с помощью нелинейной динамической модели для указанных в подрисуночной подписи параметров ЛАЧХ разомкнутого контура.

Двухпараметрические диаграммы на рис. 3, а построены при $u_{вх} = 30$ В и при изменении сопротивления нагрузки от 1,25 до 8,3 Ом, что соответствует исходным данным. Также варьировалась емкость конденсатора фильтра от 20 до 40 мкФ. При этом, как указывалось ранее, 20 мкФ – это расчетное значение емкости, а 40 мкФ – выбранное значение емкости, увеличенное в два раза относительно расчетного. Необходимость исследования влияния падения емкости на

динамику системы связана с возможностью потери емкости при ее старении и технологического разброса при производстве. Особенно это актуально для электролитических конденсаторов.

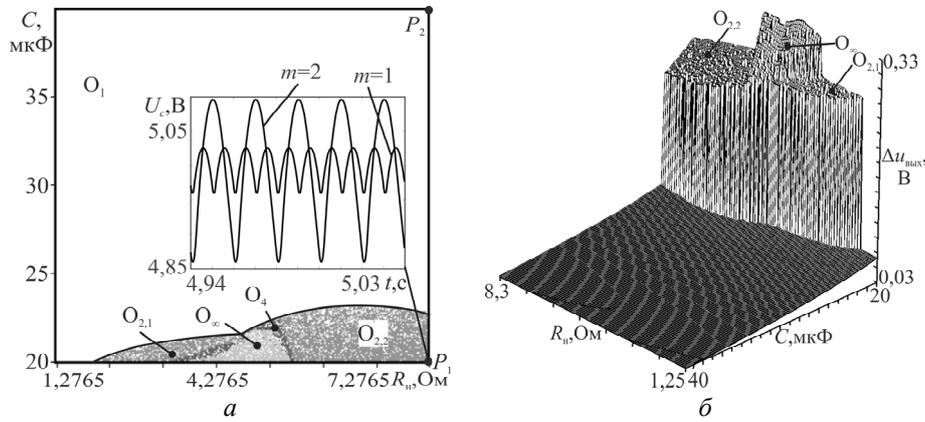


Рис. 3 – Двухпараметрические диаграммы:

a – карта динамических режимов; b – диаграмма размаха колебаний выходного напряжения при $\omega_{с0} = 200\,000$ рад/с, $\varphi_{зап} = 40^\circ$

Fig. 3 – Two-parameter diagrams:

a is a dynamic modes map; b is a peak-to-peak diagram of the output voltage at $\omega_{с0} = 200\,000$ rad/s, $\varphi_{зап} = 40$ deg

Поскольку импульсные преобразователи напряжения относятся к классу нелинейных динамических систем с внешним периодическим воздействием $u_{зг}$ от задающего генератора ЗГ (рис. 1), основным режимом их работы является колебательный режим, когда частота колебаний равна несущей частоте ШИМ $f_{ШИМ}$. Однако при дрейфе параметров системы или внешних воздействий в виде входного напряжения или сопротивления нагрузки возможно возникновение колебаний с частотой $f_{ШИМ}/m$, где m – кратность цикла, $m = 1, 2, 3, \dots$. Такие режимы в общем случае называются циклами периода m или m -циклами [8]. Также возможно возникновение хаотических колебаний.

На карте динамических режимов (рис. 3, a) O_1 – это область желаемого динамического режима (1-цикла), $O_{2,1}$, $O_{2,2}$ – области 2-циклов, O_4 – область 4-цикла, O_∞ – область хаотических колебаний. Если сопоставить карту динамических режимов (рис. 3, a) с диаграммой размаха колебаний (рис. 3, b), то видно, что при работе системы в нежелательных режимах размах колебаний существенно больше, чем в желаемом 1-цикле (светлая область O_1 на рис. 3, a). Также стоит отметить, что область нежелательных режимов $O_{2,1}$, $O_{2,2}$, O_4 , O_∞ на рис. 3, a является областью мультистабильности [7, 8], когда одновременно устойчив желаемый 1-цикл, а также нежелательные m -циклы. Об этом говорят белые вкрапления на рис. 3, a . Построение карты велось со случайных начальных условий, и система в этих областях попадала то в желаемый режим, то в нежелательный. В реальности переход в тот или иной режим может произойти под действием помех. Так, в точке P_1 устойчив желаемый 1-цикл ($m = 1$) и нежелательный 2-цикл ($m = 2$). Временные диаграммы выходного напряжения в данных режимах приведены на рис. 3, a . Явление мультистабильности характерно именно для нелинейных динамических систем.

Каждую карту динамических режимов будем характеризовать относительной площадью области нежелательных режимов $S_{нр}$, которая показывает, сколько процентов составляет площадь области нежелательных режимов от площади всей карты. Чем меньше $S_{нр}$, тем меньше вероятность возникновения нежелательных режимов при дрейфе параметров системы: входного напряжения, сопротивления нагрузки или емкости фильтра. Анализ таблицы показывает, что снижение частоты среза до 120 000 рад/с полностью исключает нежелательные режимы в выбранных диапазонах параметров (рис. 3) при всех подставленных в таблице запасах устойчивости. При достижении частоты среза 170 000 рад/с при малых запасах устойчивости в системе возможны нежелательные режимы, но при повышении $\varphi_{зап}$ до 50° нежелательные режимы полностью исключаются. То же самое наблюдается и при частоте среза 200 000 рад/с, но там площади областей нежелательных режимов больше.

Продолжим рассмотрение карты динамических режимов на рис. 3. Построим ЛАЧХ разомкнутого контура для наборов параметров, соответствующих точкам P_1 ($C = 20$ мкФ) и P_2 ($C = 40$ мкФ) на рис. 3. Обе точки соответствуют $R_n = 8,3$ Ом. Указанные ЛАЧХ приведены на рис. 4. Что характерно, система устойчива в обеих точках, даже в точке P_1 , где наблюдаются нежелательные режимы с большой амплитудой колебаний. Это говорит об ограниченности малосигнальных моделей и подтверждает необходимость применения нелинейных динамических моделей для верификации результатов. При этом, как следует из рис. 4, б, $\varphi_{зап1} = 40,5^\circ$, $\varphi_{зап2} = 40^\circ$, т. е. запас устойчивости по фазе при уменьшении емкости фильтра в 2 раза изменился незначительно.

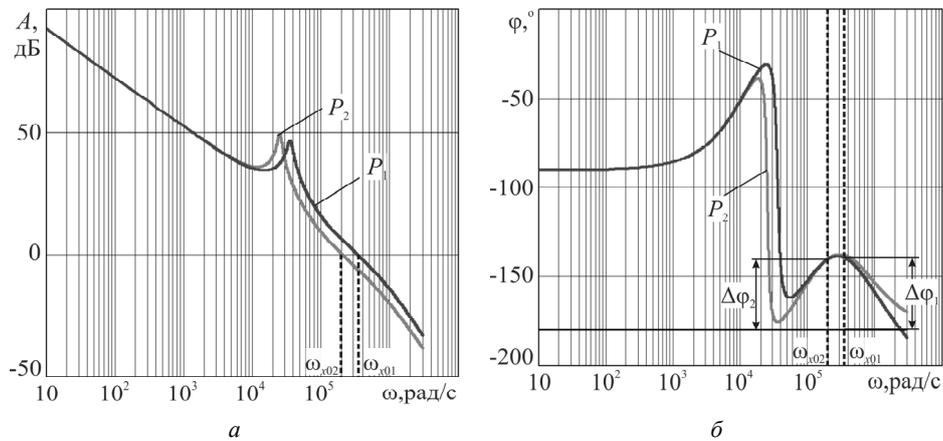


Рис. 4 – Частотные характеристики:

a – ЛАЧХ; b – ФЧХ

Fig. 4 – Bode plot:

a is a Bode magnitude plot; b is a Bode phase plot

Анализ таблицы показывает, что для устранения нежелательных динамических режимов нужно уменьшать частоту среза ω_{x0} и увеличивать запас устойчивости, что в общем очевидно. Но как говорилось ранее, от частоты ω_{x0} зависит быстродействие контура регулирования. Так что чрезмерное уменьшение частоты

среза может привести к нежелательным результатам с точки зрения быстродействия.

На рис. 5 приведены переходные процессы при ступенчатом изменении сопротивления нагрузки от 2,4 до 8 Ом. Наброс сопротивления нагрузки происходит в момент $t_{\text{возм}} = 5$ мс. При этом рассматривается два случая, когда регулятор был рассчитан: 1) при $\omega_{\text{с0}} = 200\,000$ рад/с и $\varphi_{\text{зап}} = 50^\circ$; 2) при $\omega_{\text{с0}} = 60\,000$ рад/с и $\varphi_{\text{зап}} = 50^\circ$. Из рисунка видно, что наиболее оптимальный процесс наблюдается при высокой частоте среза разомкнутого контура. В этом случае меньше как перерегулирование, так и длительность переходного процесса после наброса нагрузки. В первом случае $t_{\text{п1}} = 3,5$ мс, а во втором – $t_{\text{п2}} = 5,6$ мс. Также выбросы напряжения в переходном процессе (рис. 5) составляют $U_{\text{вых1 м}} = 5,21$ В, а $U_{\text{вых2 м}} = 5,58$ В.

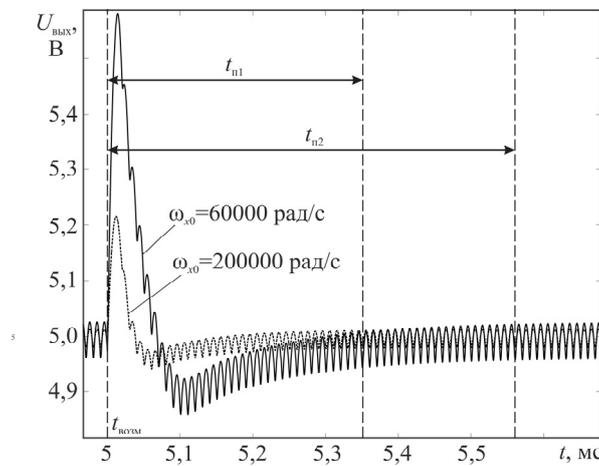


Рис. 5 – Временные диаграммы выходного напряжения

Fig. 5 – Output voltage timing diagrams

Заключение

Выбор параметров регулятора при разработке стабилизированных источников питания в общем случае является нетривиальной задачей. Особые проблемы возникают, когда предъявляются повышенные требования к быстродействию контура регулирования, где требуется повышение частоты среза разомкнутого контура часто без возможности повышения несущей частоты ШИМ и, соответственно, в полной мере проявляются недостатки малосигнальных моделей, которые чаще всего используются при расчете регуляторов. Таким образом, при решении подобных задач необходимо дополнительно использовать нелинейные динамические модели, которые в полной мере способны оценить динамику системы в условиях возможности возникновения нелинейных колебаний. И, как показано в данной работе, запас устойчивости уже выбирается не только на основе частотного анализа малосигнальных моделей разомкнутого контура, а также и на основе моделирования с использованием нелинейной модели. Кроме того, стоит учесть, что снижение частоты среза в рамках существующих в литературе рекомендаций может приводить не только к недостаточному быстродействию, но и к большим выбросам напряжения в переходном процессе, что требует более осмысленного

подхода. Также в статье показано, что расчет регуляторов требуется проводить при максимальном входном напряжении и максимальном сопротивлении нагрузки, что является наихудшим случаем.

Подходы, представленные в статье, могут применяться к широкому классу источников постоянного напряжения после соответствующего анализа и дополнительной модификации в частных случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Brown M. Power supply cookbook. – 2nd ed. – Boston: Newnes, 2001. – 265 p.
4. Белов Г.А. Теория импульсных преобразователей. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – 330 с.
5. Белов Г.А. Импульсные преобразователи с системами управления на серийных микросхемах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – 330 с.
6. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. – М.: Горячая линия-Телеком, 2019. – 540 с.
7. Баушев В.С., Жусубалиев Ж.Т., Михальченко С.Г. Стохастичность в динамике стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. – 1996. – № 3. – С. 47–53.
8. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems. – Singapore: World Scientific, 2003. – 376 p. – DOI: 10.1142/5313.
9. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
10. Белов Г.А., Серебрянников А.В., Павлова А.А. Синтез одноконтурной системы управления понижающим импульсным преобразователем // Практическая силовая электроника. – 2013. – № 3 (51). – С. 9–15.
11. Daniel Meeks. Loop stability analysis of voltage mode buck regulator with different output capacitor types – continuous and discontinuous modes: Application Report SLVA301. – Texas Instruments, 2008.
12. Wu H. Stability analysis and control of DC-DC converters using nonlinear methodologies: diss. ... doct. of philosophy / Newcastle University. – Newcastle, 2016. – 187 p.
13. Андриянов А.И. Развитие теории управления нелинейными динамическими процессами импульсных систем электропитания: дис. ... д-ра техн. наук. – Брянск, 2022. – 515 с.
14. Кобзев А.В., Коновалов Б.И., Семенов В.Д. Энергетическая электроника: учебное пособие. – Томск: Том. межвуз. центр дистанц. образования, 2010. – 164 с.

ON THE SELECTION OF PARAMETERS FOR THE CONTROLLER IN A SINGLE LOOP CONTROL SYSTEM FOR A DIRECT DC-TO-DC BUCK CONVERTER WITH RESPECT TO DYNAMIC NONLINEARITY

Andriyanov A.I.

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

The article is devoted to the issues of choosing the parameters of a proportional-integral-differentiating regulator of a single loop control system with a buck converter taking into account dynamic nonlinearities. This problem arises when it is necessary to design pulsed voltage converters with increased performance, when it is necessary to increase the cutoff frequency of an open-loop control loop without the possibility of increasing the carrier frequency of pulse width modulation due to limitations of the element base, which in some cases leads to the appearance of nonlinear effects. This must be taken into account when choosing both the open-loop cutoff frequency and the stability margin. The article proposes a nonlinear dynamic model of a direct buck

converter with a proportional-integral-differentiating regulator both in the form of a piecewise smooth system of differential equations and in the form of a Poincaré map. A method for selecting controller parameters is proposed for a given open-loop cutoff frequency, and a given stability margin, as well as for given ranges of input voltage and load resistance based on the use of numerical methods for solving systems of nonlinear equations with given restrictions. The nonlinear dynamics of the system was studied for various sets of controller parameters. It is shown that with an increase in the cutoff frequency and small stability margins, undesirable dynamic modes may arise in the system when the filter capacitance drops within the calculated values, while linear dynamic models show the stability of the system. To eliminate the possibility of the emergence of undesirable modes, it is necessary to increase the stability margin with subsequent monitoring of the results using a nonlinear dynamic model. The proposed method for selecting the cutoff frequency of an open loop and the phase stability margin, based on the analysis of nonlinear dynamics, allows you to design power supplies with increased performance.

Keywords: direct buck converter, power supply, control system, proportional-integral-differentiating regulator, closed-loop system, stability margin, nonlinear dynamics.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-7-23

REFERENCES

1. Severns R., Bloom G. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya* [Modern DC-to-DC switchmode power converter circuits]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. (In Russian).
2. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p.
3. Brown M. *Power supply cookbook*. 2nd ed. Boston, Newnes, 2001. 265 p.
4. Belov G.A. *Teoriya impul'snykh preobrazovatelei* [Pulse converter theory]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2016. 330 p.
5. Belov G.A. *Impul'snye preobrazovateli s sistemami upravleniya na seriinykh mikrokhemakh* [Pulse converters with control systems based on serial microcircuits]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2015. 330 p.
6. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V. *Ustoichivost' i elektromagnitnaya sovmestimost' ustroystv i sistem elektropitaniya* [Stability and electromagnetic compatibility of devices and power supply systems]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2019. 540 p.
7. Baushev V.S., Zhusubaliyev Zh.T., Mihal'chenko S.G. Stokhastichnost' v dinamike stabilizatora napryazheniya s shirotno-impul'snym regulirovaniem [Stochasticity in dynamics of a voltage regulator with pulse duration control]. *Elektrichestvo = Electrical Technology Russia*, 1996, no. 3, pp. 69–75.
8. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. *Bifurcations and chaos in piecewise-smooth dynamical systems*. Singapore, World Scientific, 2003. 376 p. DOI: 10.1142/5313.
9. Popov E.P. *Teoriya lineinykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya i upravleniya* [Theory of linear systems of automatic regulation and control: textbook manual for universities]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 304 p.
10. Belov G.A., Serebryannikov A.V., Pavlova A.A. Sintez odnokonturnoi sistemy upravleniya ponizhayushchim impul'snym preobrazovatelem [Synthesis of a single-loop control system for buck switch mode converter]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2013, no. 3 (51), pp. 9–15. (In Russian).
11. Daniel Meeks. *Loop stability analysis of voltage mode buck regulator with different output capacitor types – continuous and discontinuous modes*. Application Report SLVA301. Texas Instruments, 2008.
12. Wu H. *Stability analysis and control of DC-DC converters using nonlinear methodologies*. Dr. of philosophy Diss. Newcastle, 2016. 187 p.
13. Andriyanov A.I. *Razvitie teorii upravleniya nelineinymi dinamicheskimi protsessami impul'snykh sistem elektropitaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of the theory of control of nonlinear dynamic processes of impulse power supply systems. Dr. eng. sci. diss. Bryansk, 2022. 515 p.
14. Kobzev A.V., Kononov B.I., Semenov V.D. *Energeticheskaya elektronika* [Energy electronics]. Tomsk, Tomskii mezhvuzovskii tsentr distantsionnogo obrazovaniya Publ., 2010, 164 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Андрьянов Алексей Иванович – родился в 1979 году, д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы», Брянский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, нелинейная динамика. Опубликовано 139 научных работ. (Адрес: 241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7. E-mail: mail@ahaos.ru).

Andriyanov Alexey Ivanovich (b. 1979) – Doctor of Sciences (Eng.), associate professor, professor, Department of Electronics, Radioelectronic and Electro-technical Systems, Bryansk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics and nonlinear dynamics. He is the author of 139 scientific papers. (Address: 7, 50 let Oktyabrya boul, Bryansk, 241035, Russia. E-mail: mail@ahaos.ru).

*Статья поступила 28 февраля 2024 г.
Received February 28, 2024*

To Reference:

Andriyanov A.I. К выбору параметров регулятора непосредственного понижайущего преобразователя с одноконтурной системой управления с учетом динамических нелинейностей [On the selection of parameters for the controller in a single loop control system for a direct DC-to-DC buck converter with respect to dynamic nonlinearity]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 7–23. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-7-23.

УДК 544.452.42

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Е.Б. Бутаков, С.С. Абдуракипов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе

В ходе исследования была изучена возможность мониторинга и выявления аномалий в процессе горения по закономерностям визуализации пламени в топочном пространстве. Экспериментальные исследования проводились на полупромышленном стенде с целью изучения горения пылевидного угля. Изображения процесса горения были классифицированы с использованием алгоритма глубокого обучения для конечного числа соответствующих коэффициентов избытка воздуха (α). По коэффициенту избытка воздуха мы разделили режимы горения на три основных класса: эффективные, неэффективные и аномальные. Этот тип классификации обеспечивает простой подход к оптимизации процесса сгорания и оповещению системы в случае критических событий. Полученная модель выполнила классификацию режимов горения с точностью в диапазоне 87 – 91 %.

Ключевые слова: машинное обучение, сверточные нейронные сети, оптимизация сжигания угля, обнаружение аномалий, электростанция.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-24-31

Введение

Энергетика является одной из основных отраслей промышленности, обеспечивающей комфортное и современное существование человека. В последние десятилетия взято направление на развитие чистой и возобновляемой энергетики [1]. В 2023 году инвестиции в возобновляемую энергетику составили 1740 миллиардов USD, при этом в ископаемое топливо 1050 миллиардов USD [2]. Однако возобновляемая энергетика не может полностью обеспечить человечество энергией. Доля солнечной и ветровой энергии – 10,8 % [3]. Последние несколько лет в энергетическом секторе наблюдается кризис. В связи с изменением в международных отношениях нарушились поставки газа в Европу, что привело к росту использования угля [4]. На данный момент доля угля в общей выработке энергии составляет 36 % [5]. Несмотря на сложности в экологическом и эффективном сжигании угля, существуют способы развития данного направления [6, 7]. Одним из путей решения данной задачи является развитие современных систем диагностики и управления процессами сжигания топлива, которые позволят определять неблагоприятные режимы работы котла и осуществлять автоматическое регулирование входных параметров для поддержания оптимального режима [8, 9]. С помощью методов компьютерного зрения можно идентифицировать пламя, выполнять его локализацию, анализировать его характеристики как в ограниченном, так и в большом открытом пространстве [10, 11]. В настоящее время использование данных автоматизированных методов в промышленности находит несомненный практический и научный интерес [12].

Разработка алгоритмов машинного обучения на основе полупромышленных тепловых стендов позволит подойти к созданию автоматизированной системы, способной обнаружить и подстроить энергоэффективные и экологичные режимы сжигания на крупных электростанциях и увеличить их КПД без существенных

изменений в конструкции котельного оборудования. Например, в работе [7] проведен эксперимент по регулировке сжигания угля в котле мощностью 660 МВт. Авторы показали, что разработанная модель компьютерного зрения может успешно классифицировать режимы горения. Авторы применили алгоритм, основанный на сверточном автокодировщике, методе главных компонент и марковской модели для контроля режима горения на основе изображений пламени, которые собираются из системы контроля горения топки. В работе [9] представлены результаты исследования геометрических и световых характеристик пылеугольного пламени с использованием разработанной системы контроля пламени. Результаты, полученные в различных условиях горения, показывают, что разработанная система способна характеризовать пламя как качественно, так и количественно. Выявляются и анализируются корреляции между измеренными параметрами пламени и соответствующими параметрами работы печи, включая нагрузку печи, массовый расход первичного воздуха и размер частиц. В статье [10] рассматривается прогноз производительности (мощности) угольной электростанции мощностью 600 МВт на основе нейронной сети. Развитие таких моделей особенно важно для повышения эффективности электростанций. В литературе повышенное внимание уделяется моделированию и сокращению выбросов NO_x , SO_x для угольных котлов с использованием передовых методов машинного обучения. Авторы провели сравнительный анализ различных моделей машинного обучения: линейной регрессии, метода опорных векторов, полносвязных и рекуррентных нейронных сетей. По результатам моделирования была показана возможность сокращения выбросов NO_x до 15–20 %, что в дальнейшем было подтверждено авторами экспериментально. Своевременный и точный прогноз основных качественных характеристик отсепарированного угля играет важную роль в мониторинге состояния и управлении производством, однако характеристики качества угля, как правило, трудно измерить напрямую в режиме онлайн в промышленной практике. В работе [11] авторы предложили решить проблему с использованием виртуальных датчиков на основе глубокого обучения. Предложенная модель представляла собой многоуровневый автоэнкодер и двунаправленную рекуррентную нейросеть (Bidirectional Long short-term memory network, Bi-LSTM). Важной особенностью было совместное использование размеченных и неразмеченных данных, которые применялись для повышения качества модели обучения с учителем.

Разработка подходов с применением интеллектуальных алгоритмов, таких как нейронные сети, на основе полупромышленных тепловых стендов позволит подойти к созданию автоматизированной системы, способной обнаружить и поддерживать энергоэффективные и экологичные режимы сжигания на крупных электростанциях, увеличить КПД без существенных изменений в конструкции котельного оборудования. Данная научная проблематика является актуальной и направлена на создание перспективных технологий управления процессами сжигания твердого топлива.

1. Экспериментальная установка

Для формирования корпуса обучающих данных для обучения нейронной сети проводились эксперименты по сжиганию угля на экспериментальном стенде (рис. 1) [19]. Стенд оснащен горизонтальной топкой цилиндрической формы длиной 5 м, включающей в себя отдельные секции: камера сгорания (внутренний диаметр 0,3 м, длина 2 м) предназначена для воспламенения и горения топлива, а также проведения визуальных наблюдений; камера дожигания (внутренний диаметр 1 м, длина 3 м), где происходит догорание топлива. Стенд работает следующим образом. Уголь засыпается в бункер, после чего шнековым питателем

и норией подается в мельницу-десинтегратор, где уголь измельчается до пылевидного состояния со средним размером 50 мкм. После мельницы уголь поступает в воздушный эжектор, где происходит смешение с первичным воздухом. Угольная пыль с воздухом поступает в электродуговой блок, где инициируется воспламенение угля при прохождении через плазменные дуги. Воспламенившийся уголь подается в камеру сгорания, где протекает дальнейшее горение угольной пыли. Недогоревшее топливо поступает в камеру дожигания, где смешивается со вторичным воздухом, необходимым для полного выгорания топлива. Дымовые газы поступают в циклон, где происходит улавливание золы. По длине камеры сгорания контролируется температура с использованием платинородиевых термопар. Газовый анализ в экспериментах измерялся в конце камеры сгорания. Видео процесса горения записывалось через смотровое окно в камере сгорания.

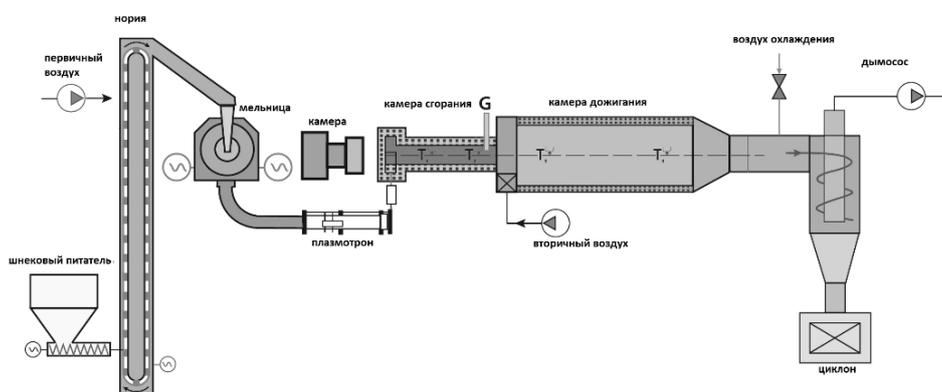


Рис. 1 – Экспериментальный стенд

Fig. 1 – Experimental stand

2. Описание нейронной сети и результаты.

В результате проведения экспериментов были получены данные для обучения и тестирования выбранной модели классификации на основе нейронной сети. Примеры выборки изображений приведены на рис. 2. Для трех различных альфа и трех произвольных моментов времени. На изображениях с меньшим альфа отчетливо видно больше сажи (затемненная зона).

Для мониторинга и обнаружения аномалий процесса горения по изображениям пламени использовались методы глубокого обучения, основанные на классификации на конечном числе классов. В этом подходе архитектура нейросети представляла собой комбинацию сверточных и полносвязных слоев наподобие известной архитектуры AlexNet (рис. 3).

Большая часть исходного изображения, содержащая затемненную область, была обрезана. Разрешение исходных данных было уменьшено до 256×256 пикс. Данные были разделены на обучающую, тестовую и валидационную выборки. В обучающую выборку попало 10 000 изображений, в тестовую – 200 изображений и 500 – в валидационную.

Целью экспериментов являлось обучение сверточной нейронной сети с устойчивостью к искажениям изображений и шуму в данных. Было применено эффективное решение – аугментация, в рамках которого обучающие данные искусственно расширялись искаженными версиями изображений во время обучения.

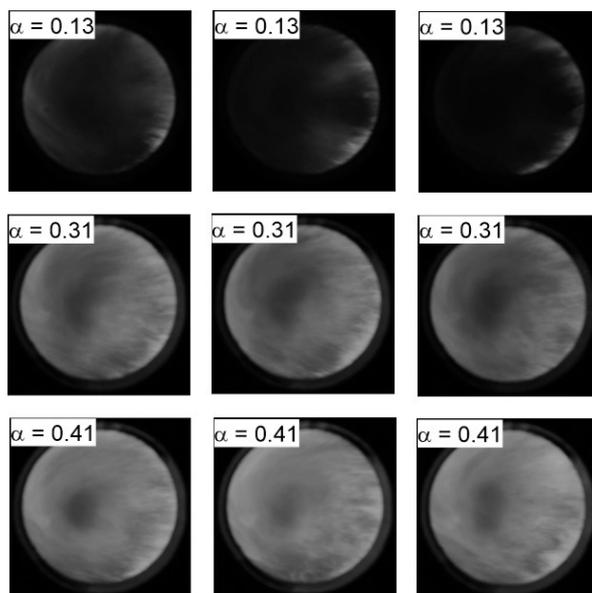


Рис. 2 – Примеры схем горения пламени при различных значениях коэффициента избытка воздуха α

Fig. 2 – Examples of flame combustion schemes at various values excess air coefficient α .

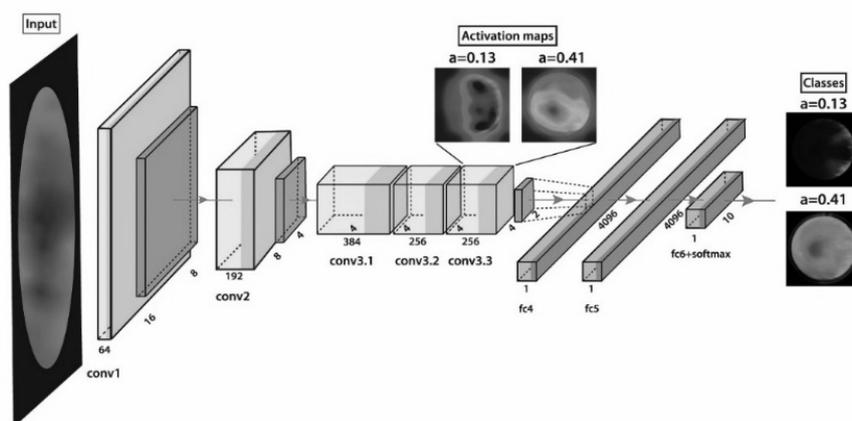


Рис. 3 – Комбинированная архитектура модели для классификации режимов горения по значению коэффициента избытка воздуха α

Fig. 3 – Combined architecture of the model for classifying combustion modes by the value of the excess air coefficient α .

Для реализации этой процедуры мы использовали фреймворк Keras, который предоставляет интерфейс для расширения обучающего набора – класс Image DataGenerator. Использовались процедуры ModelCheckpoint для контроля и сохранения весов нейронной сети в процессе обучения и процедура ранней остановки EarlyStopping для контроля функции потерь на валидационной выборке со значением, равным 10 (обучение останавливалось, если функция потерь не

уменьшалась в течение 10 эпох). Итоговое количество эпох равнялось 500, размер батча изображений для шага оптимизации равнялся 8. В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропийная функция потерь (LogLoss). В качестве метода оптимизации использовался адаптивный инерционный метод Адама. Примеры карт активации в сверточных слоях нейросети (классификатора) для разных классов представлены на рис. 4. Карты активации показывают, что нейросеть обращает внимание на форму и размеры затененной области при отнесении изображения к определенному классу.

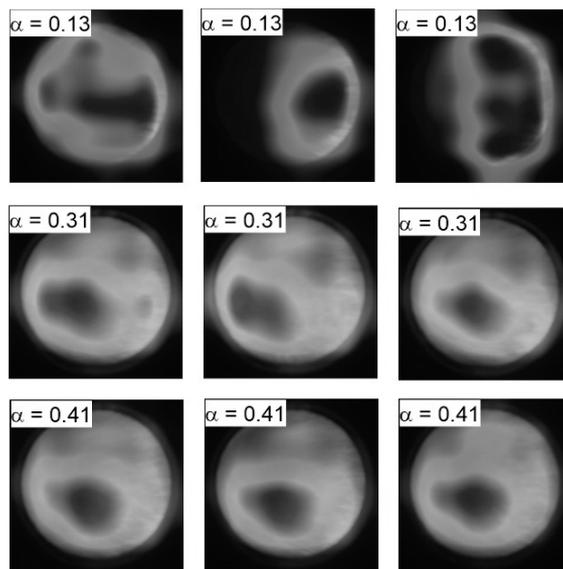


Рис. 4 – Примеры карт активации в сверточных слоях нейронной сети для разных классов

Fig. 4 – Examples of activation maps in convolutional layers of a neural network for different classes

На рис. 5 показана матрица ошибок по картинкам горения. Из матрицы ошибок можно видеть, что худшая точность для класса $\alpha = 0.21$ – 80 %, а лучшая для класса $\alpha = 0,35$ – 92 %, средняя точность по всем классам составляет 87 %.

Заключение

Таким образом, показана возможность использования подходов компьютерного зрения, в частности, сверточных нейронных сетей для обнаружения аномальных режимов горения угольной пыли в камере сгорания, соответствующих низким значениям коэффициента избытка воздуха. Классификатор позволяет определять режим горения и коэффициент избытка воздуха по изображениям пламени со средней точностью 87%, что является удовлетворительным показателем для промышленного использования. Стоит отметить, что наибольшее влияние на качество модели оказали регуляризация, инициализация весов, подбор размера батча и циклической скорости обучения. Точность и полнота модели могут быть значительно улучшены путем сбора более подробных данных с контролируемыми параметрами сгорания, что сделает маркировку изображений более точной. В этом направлении будет проводиться дальнейшая работа.

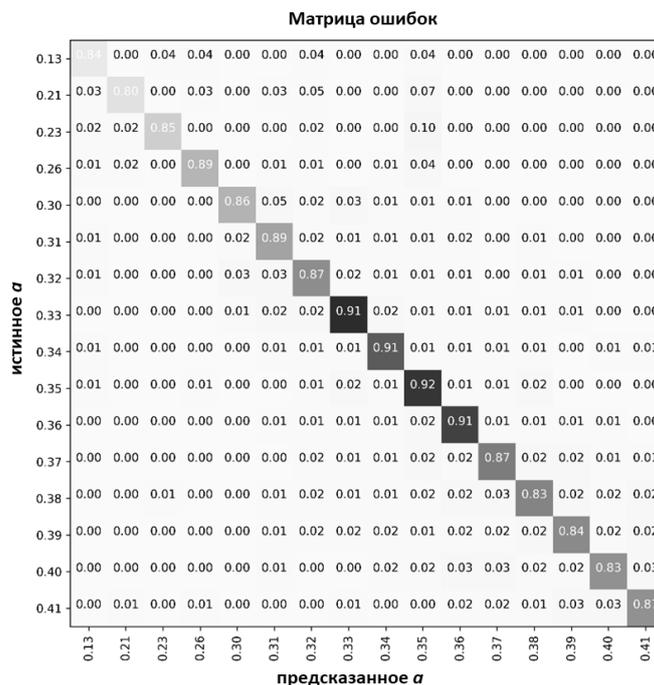


Рис. 5 – Матрица ошибок модели прогнозирования α по закономерностям горения (диагональ матрицы отражает точность классификации)

Fig. 5 – Error matrix of the prediction model α based on combustion patterns (the diagonal of the matrix reflects the classification accuracy)

ЛИТЕРАТУРА

1. Exploring model-based decarbonization and energy efficiency scenarios with PROMETHEUS and TIAM-ECN / P. Fragkos, F.D. Longa, E. Zisarou, B.V. Zwaan, A. Giannousakis, A. Fattahi // *Energies*. – 2023. – Vol. 16 (18). – P. 6421. – DOI: 10.3390/en16186421.
2. IEA. World Energy Investment 2023 / International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023> (accessed: 24.05.2024).
3. Enerdata. World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2023. – URL: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html> (accessed: 24.05.2024).
4. Loewen B. Coal, green growth and crises: Exploring three European Union policy responses to regional energy transitions // *Energy Research & Social Science*. – 2022. – Vol. 93. – P. 102849.
5. IEA. World Energy Outlook 2022 / International Energy Agency. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (accessed: 24.05.2024).
6. Chen L., Yong S.Z., Ghoniem A.F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2012. – Vol. 38. – P. 156–214.
7. Sankar G., Kumar D.S., Balasubramanian K.R. Computational modeling of pulverized coal fired boilers – A review on the current position // *Fuel*. – 2019. – Vol. 236. – P. 643–665.
8. Zhang T., Yi Y., Xu Y. A multi-scale sampling method for accurate and robust deep neural network to predict combustion chemical kinetics // *Combustion and Flame*. – 2022. – Vol. 245. – P. 112319.
9. Dynamic model and deep neural network-based surrogate model to predict dynamic behaviors and steady-state performance of solid propellant combustion / M.Y. Jung, J.H. Chang, M. Oh, C.H. Lee // *Combustion and Flame*. – 2023. – Vol. 250. – P. 112649.

10. Artificial neural network models for heat transfer in the combustion chamber of a bubbling fluidised bed combustion system / N. Doner, K. Ciddi, I.B. Yalcin, M. Sarivaz // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2023. – Vol. 49. – P. 103145.
11. Towards a generalised artificial neural network for sub-grid filtered density function closure in turbulent combustion / H. Yang, T. Kobayashi, S. Iavarone, J.C. Massey, Z.X. Chen // *Applications in Energy and Combustion Science*. – 2023. – Vol. 14. – P. 100142.
12. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test / E.B. Butakov, A.P. Burdukov, S.V. Alekseenko, E.N. Yaganov // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2022. – Vol. 31. – P. 375–383.
13. **Burdukov A.P., Butakov E.B., Chernova G.V.** Ignition and lighting of coal-fired boilers with mechanically activated micronized coal instead of fuel oil // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2020. – Vol. 29. – P. 492–502.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR DIAGNOSTICS AND CONTROL OF COAL DUST COMBUSTION MODES

Butakov E.B., Abdurakipov S.S.

Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS

The study examined the possibility of monitoring and identifying anomalies in the combustion process based on the patterns of flame visualization in the combustion space. Experimental studies were carried out on a semi-industrial stand to study the combustion of pulverized coal. Combustion images were classified using a deep learning algorithm for a finite number of corresponding excess air coefficients (α). Based on the excess air coefficient, we divided combustion modes into three main classes: efficient, ineffective and anomalous. This type of classification provides a simple approach to optimize the combustion process and alert the system in the event of critical events. The resulting model classified combustion modes with an accuracy in the range of 87 – 91 %.

Keywords: machine learning, convolutional neural networks, coal combustion optimization, anomaly detection, power plant.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-24-31

REFERENCES

1. Fragkos P., Longa F.D., Zisarou E., Zwaan B.V., Giannousakis A., Fattahi A. Exploring model-based decarbonization and energy efficiency scenarios with PROMETHEUS and TIAM-ECN. *Energies*, 2023, vol. 16 (18), p. 6421. DOI: 10.3390/en16186421.
2. IEA. *World Energy Investment 2023*. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023> (accessed 24.05.2024).
3. Enerdata. *World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2023*. Available at: <https://yearbook.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html> (accessed 24.05.2024).
4. Loewen B. Coal, green growth and crises: Exploring three European Union policy responses to regional energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 2022, vol. 93, p. 102849.
5. IEA. *World Energy Outlook 2022*. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (accessed 24.05.2024).
6. Chen L., Yong S.Z., Ghoniem A.F. Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, vol. 38, pp. 156–214.
7. Sankar G., Kumar D.S., Balasubramanian K.R. Computational modeling of pulverized coal fired boilers – A review on the current position. *Fuel*, 2019, vol. 236, pp. 643–665.
8. Zhang T., Yi Y., Xu Y. A multi-scale sampling method for accurate and robust deep neural network to predict combustion chemical kinetics. *Combustion and Flame*, 2022, vol. 245, p. 112319.
9. Jung M.Y., Chang J.H., Oh M., Lee C.-H. Dynamic model and deep neural network-based surrogate model to predict dynamic behaviors and steady-state performance of solid propellant combustion. *Combustion and Flame*, 2023, vol. 250, p. 112649.

10. Doner N., Ciddi K., Yalcin I.B., Sarivaz M. Artificial neural network models for heat transfer in the combustion chamber of a bubbling fluidised bed combustion system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, vol. 49, p. 103145.
11. Yang H., Kobayashi T., Iavarone S., Massey J.C., Chen Z.X. Towards a generalised artificial neural network for sub-grid filtered density function closure in turbulent combustion. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2023, vol. 14, p. 100142.
12. Butakov E.B., Burdukov A.P., Alekseenko S.V., Yaganov E.N. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, vol. 31, p. 375–383.
13. Burdukov A.P., Butakov E.B., Chernova G.V. Ignition and lighting of coal-fired boilers with mechanically activated micronized coal instead of fuel oil. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, vol. 29, pp. 492–502.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бутаков Евгений Борисович – родился в 1990 году, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 53 научные работы. (Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Butakov Evgenii (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), Senior Researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Абдуракипов Сергей Сергеевич – родился в 1990 году, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Abdurakipov Sergey (b. 1990) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia, E-mail: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Статья поступила 15 ноября 2024 г.
Received November 15, 2024

To Reference:

Butakov E.B., Abdurakipov S.S. Primenenie metodov mashinnogo obucheniya dlya diagnostiki i upravleniya rezhimami szhiganiya ugol'noi pyli [Application of machine learning methods for diagnostics and control of coal dust combustion modes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 24–31. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-24-31.

УДК 621.396.69

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ НА НЕЛИНЕЙНОСТЬ
В ГИБРИДНОМ RC-ЦАП****М.С. Енученко, Н.В. Квашина, М.М. Пилипко***Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

Настоящая статья посвящена анализу влияния отклонений элементов на нелинейность N -разрядного гибридного RC-цифроаналогового преобразователя. В рассматриваемой структуре гибридного цифроаналогового преобразователя старшие значащие разряды обрабатываются емкостным бинарным сегментом, в то время как младшие значащие разряды – резистивным унарным. Так как рассматриваемый цифроаналоговый преобразователь гетерогенный, т. е. элементы разных сегментов различны и, следовательно, имеют разную площадь, что приводит к смещению оптимального отношения разрядностей сегментов для минимизации площади преобразователя. В этой связи целью данной работы является определение оптимальных разрядностей сегментов в зависимости от соотношения площадей резистора и конденсатора. Разработана параметрическая математическая модель рассматриваемого преобразователя в MATLAB, учитывающая случайный разброс элементов в обоих сегментах. Проведено моделирование влияния разброса элементов на дифференциальную и интегральную нелинейности. При оптимальном выборе разрядностей сегментов и росте разрядности цифроаналогового преобразователя нелинейность ухудшается. Для улучшения линейности необходимо увеличение площади преобразователя либо за счет увеличения площади компонентов, либо за счет увеличения разрядности емкостного сегмента при сохранении той же площади компонентов. Младший резистивный сегмент оказывает сниженное влияние на нелинейность в отличие от старшего емкостного сегмента. При площади резистора, составляющей от 0,1 до 10 площадей конденсатора, вклад резистивного сегмента в дифференциальную нелинейность на два порядка меньше, чем емкостного. При увеличении разрядности и оптимальном выборе разрядности сегментов вклад младшего резистивного сегмента в интегральную нелинейность снижается.

Ключевые слова: цифроаналоговый преобразователь, гибридный RC-ЦАП, отклонение, емкостный, резистивный, нелинейность, DNL, INL.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-32-42

Введение

В современных телекоммуникационных системах высокостребованы интерфейсные электронные устройства, так как требуется обеспечить связь между аналоговой и цифровой частями схемы. Одним из таких устройств является цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), осуществляющий преобразование цифрового кода в соответствующий аналоговый сигнал, например, заряд, напряжение или ток. Процесс преобразования заключается в формировании аналогового сигнала, пропорционального весу разрядов цифрового кода, с помощью электронных компонентов, называемых взвешивающими элементами ЦАП (далее «элементы»), например, резисторов или конденсаторов. В соответствии с отношением весов элементов выделяют две распространенные архитектуры ЦАП – унарную и бинарную. Унарная архитектура использует элементы с равными весами, в то время как элементы бинарной архитектуры являются двоично-взвешенными, т. е. их веса равны 2^M , где M – номер разряда в диапазоне от 0 до $N - 1$, где N – разрядность ЦАП. Кроме упомянутых вариантов, также выделяют сегментную архитектуру

туру ЦАП, которая содержит унарную и бинарную части или сегменты (далее «сегменты») и является компромиссным решением между унарной и бинарной архитектурами.

В качестве элементов ЦАП могут выступать три основных типа электронных компонентов: транзисторы, выполняющие роль источников тока, резисторы и конденсаторы. Преимущество ЦАП на источниках тока заключается в отсутствии выходного буфера, что улучшает линейность характеристики преобразования ЦАП и его быстродействие, при этом снижая потребляемую мощность. Однако отсутствие выходного буфера препятствует обеспечению широкого диапазона значений выходного напряжения, например, от уровня земли до напряжения питания. При этом значение сопротивления нагрузки для таких ЦАП может изменяться в строго ограниченном диапазоне. В целях обеспечения полного диапазона значений выходного напряжения необходимо рассматривать ЦАП с выходным буфером, который строится на основе резисторов [1] или конденсаторов [2].

С точки зрения занимаемой площади на кристалле, резистивный ЦАП является наиболее компактным решением, использующим выходной буфер [3–6]. Тем не менее такой преобразователь при высокой разрядности потребует наличия нескольких буферов, что наряду с резистивным делителем внесет вклад в потребление мощности. Снижение потребления возможно достичь в случае емкостного ЦАП, элементы которого к тому же менее подвержены технологическому разбросу в отличие от резисторов. Однако при этом конденсаторы более чувствительны к паразитным компонентам на топологии схемы, ухудшающим линейность, влияние которых усиливается с ростом разрядности ЦАП [7–9]. Таким образом, компромиссным решением для высокоразрядных ЦАП с низким потреблением мощности является гибридный RC-ЦАП, состоящий из резистивного и емкостного сегментов [10–13]. За счет сниженной разрядности емкостного сегмента общая длина проводников в гибридном RC-ЦАП уменьшена, что снижает влияние паразитных параметров на значения элементов. Кроме того, для такого ЦАП необходим только один выходной буфер.

Качество согласования элементов ЦАП главным образом определяет линейность его передаточной характеристики. В случае гибридного RC-ЦАП параметры отклонений резисторов и конденсаторов наряду с их площадями различны. Это обстоятельство приводит к смещению оптимального отношения разрядностей сегментов, которое обеспечивает минимальную площадь на кристалле, относительно гомогенного случая. Кроме того, предыдущие публикации не углублялись во влияние параметров структуры и компонентов схемы на нелинейность ЦАП. В связи с этим целью настоящей работы является исследование зависимости оптимального отношения сегментов от параметров элементов, а также анализ влияния отклонений рассматриваемого гибридного сегментного RC-ЦАП на нелинейность.

1. Структура гибридного RC-ЦАП

На рис. 1 изображен рассматриваемый N -разрядный гибридный RC-ЦАП [2], который состоит из двух сегментов: K -разрядный бинарный емкостный сегмент для старших значащих разрядов (СЗР) и $(N-K)$ -разрядный унарный резистивный сегмент для младших значащих разрядов (МЗР). Работа обоих емкостного и резистивного сегментов управляется сигналами M и L соответственно. Сигнал RST_C отвечает за сброс емкостного массива для предотвращения накопления остаточного заряда.

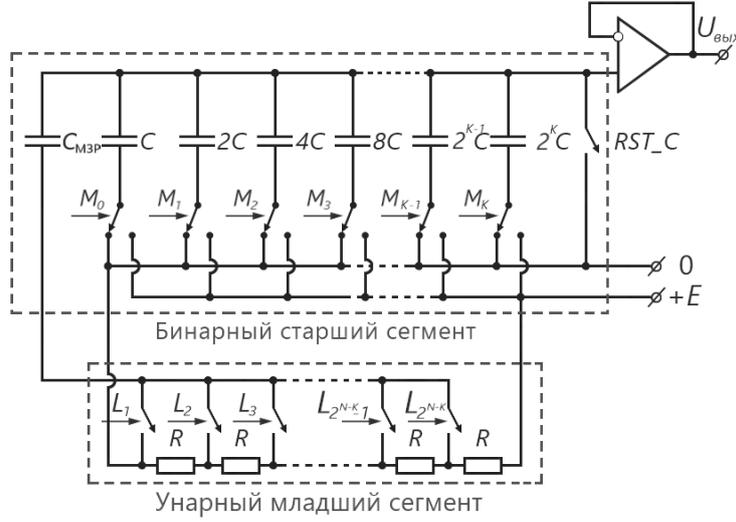


Рис. 1 – Структура рассматриваемого гибридного RC-ЦАП

Fig. 1 – The considered hybrid RC-DAC structure

С точки зрения минимизации площади, для гомогенного ЦАП (содержит элементы только одного типа) оптимальным решением являются равные разрядности сегментов. Из-за различных площадей резисторов и конденсаторов оптимальное отношение разрядностей сегментов в гибридном RC-ЦАП смещено. С учетом условия минимизации площади оптимальное отношение обоих сегментов гибридного ЦАП (без учета проводников) может быть получено из выражения (1):

$$Q(N, K) = 2^K + m \cdot 2^{N-K_{\text{опт}}} \quad (1)$$

где $Q(N, K)$ – общая площадь обоих сегментов ЦАП; N – разрядность ЦАП; $K_{\text{опт}}$ – оптимальная разрядность емкостного сегмента и m – отношение площадей компонентов (площадь резистора на площадь конденсатора).

Минимум функции $Q(N, K)$ определяется ее первой производной:

$$Q'(N, K_{\text{опт}}) = \frac{dQ(N, K)}{dK_{\text{опт}}} = 0,$$

$$Q'(N, K) = \ln 2 \cdot 2^K - m \cdot \ln 2 \cdot 2^{N-K}.$$

Следовательно, выражение для оптимальной разрядности емкостного сегмента $K_{\text{опт}}$ может быть получено из следующего выражения:

$$\ln 2 \cdot 2^{K_{\text{опт}}} - m \cdot \ln 2 \cdot 2^{N-K_{\text{опт}}} = 0,$$

$$2^{K_{\text{опт}}} = m \cdot 2^{N-K_{\text{опт}}},$$

$$K_{\text{опт}} = \frac{\log_2 m + N}{2} = \log_4 m + \frac{N}{2},$$

$$K_{\text{опт}} = \log_2 m + N - K_{\text{опт}},$$

$$K_{\text{опт}} = \frac{\log_2 m + N}{2} = \log_4 m + \frac{N}{2}. \quad (2)$$

Таким образом, было получено выражение (2) для оптимальной разрядности $K_{\text{опт}}$. Для фиксированной разрядности ЦАП значение $K_{\text{опт}}$ однозначно определяет разрядность второго сегмента, которая равна $N - K_{\text{опт}}$. На рис. 2 изображены зависимости оптимальной разрядности $K_{\text{опт}}$ от отношения площадей элементов m для набора разрядностей ЦАП от 8 до 14. Когда параметр равен 1, что справедливо для гомогенного случая ЦАП, оптимальные разрядности обоих сегментов равны $N/2$. В гетерогенном ЦАП, когда площадь конденсаторов увеличивается относительно площади резисторов, $K_{\text{опт}}$ снижается в целях компенсации присутствующей разницы между площадями обоих сегментов.

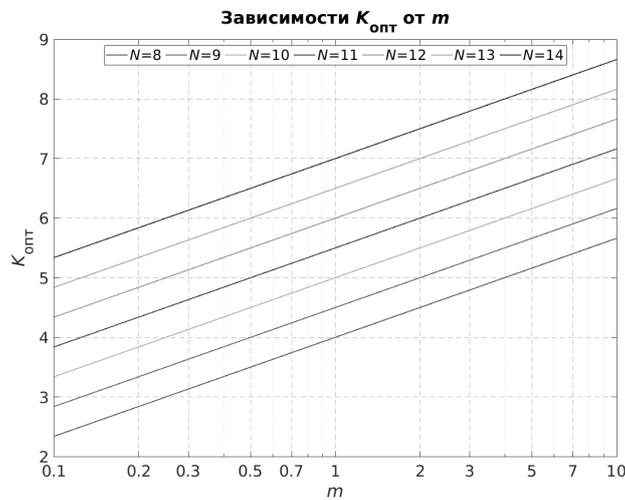


Рис. 2 – Зависимости $K_{\text{опт}}$ от m

Fig. 2 – Dependences of K_{opt} on m

Для построения сегмента, управляемого СЗР, наиболее подходящими элементами являются конденсаторы благодаря тому, что они менее подвержены отклонениям в отличие от резисторов. Кроме того, учитывая упомянутую ранее чувствительность конденсаторов к паразитным компонентам на топологии схемы, для емкостного сегмента целесообразно использование бинарной архитектуры из-за уменьшенной общей длины проводников. Резистивный сегмент при этом имеет унарную архитектуру и управляется МЗР. Так как резисторы более чувствительны к разбросу значений в результате производства в сравнении с конденсаторами, выбор унарной архитектуры обоснован гарантированной монотонностью передаточной характеристики. Резистивный сегмент формирует опорное напряжение для конденсатора $C_{\text{МЗР}}$ (см. рис. 1). Отклонения этого конденсатора являются дополнительным источником ошибки для сигнала сегмента, управляемого МЗР. Также рассматриваемая структура ЦАП содержит выходной буфер для предотвращения влияния нагрузки на передаточную характеристику.

В данной работе представлена разработка параметрической математической модели для рассматриваемого гибридного RC-ЦАП в программном пакете

MATLAB. Разрабатываемая модель используется для анализа влияния разброса элементов на дифференциальную и интегральную нелинейности ЦАП (DNL и INL соответственно).

2. Моделирование

Для разрабатываемой математической модели параметрами являются разрядность ЦАП N , разрядность емкостного сегмента K и среднеквадратичное отклонение σ . Модель формирует два массива элементов, соответствующих резистивному и емкостному сегментам: массив из 2^{N-K} резисторов и массив 2^K конденсаторов. К каждому элементу обоих массивов добавляется случайная ошибка, подчиняющаяся нормальному распределению. В данной работе было выбрано нормальное распределение, так как оно наиболее распространено для исследования влияния случайной ошибки [14]. Среднеквадратичное отклонение σ вводимой случайной ошибки зависит от типа элемента, к которому она добавляется (резистор или конденсатор), и определяется с помощью выражения

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{S}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент Пелгрона для определенного типа элемента; S – площадь одного элемента. В настоящей работе использованы следующие коэффициенты Пелгрона для технологии КМОП 180 нм: $A_R = 1,49 \% \times \text{мкм}$ для резисторов и $A_C = 0,3 \% \times \text{мкм}$ для конденсаторов. Сопротивление одного резистора составляет 1650 Ом, его геометрические размеры равны 5 мкм на 1 мкм и среднеквадратичное отклонение σ_R составляет $6,7 \cdot 10^{-3}$. Емкость одного конденсатора составляет 235 пФ, его геометрические размеры равны 10 мкм на 10 мкм и среднеквадратичное отклонение σ_C составляет $0,3 \cdot 10^{-3}$. При указанных размерах элементов отношение площадей m составляет 0,05. При этом нелинейность характеристики преобразования ЦАП пропорциональна среднеквадратичному отклонению. Поэтому абсолютные значения среднеквадратичного отклонения не повлияют на выводы, сделанные в данном исследовании. Кроме того, в данной структуре ЦАП необходимо учитывать разброс конденсатора $C_{МЗР}$, управляемого резистивным сегментом, при формировании выходного сигнала ЦАП.

После формирования массивов рассчитываются передаточные характеристики ЦАП. Был проведен анализ по методу Монте-Карло, количество запусков которого составляет 10 000. Для каждой построенной передаточной характеристики были рассчитаны максимальные DNL и INL. На рис. 3 изображены гистограммы максимальных DNL и INL для четных разрядностей от 8 до 14 (для рассматриваемого случая $m = 0,05$, разрядности резистивного и емкостного сегментов равны). Результаты моделирования представлены для трех случаев: с учетом отклонений резисторов и конденсаторов, с учетом отклонений только конденсаторов и только резисторов.

Результаты демонстрируют увеличение обеих нелинейностей при росте разрядности N . Основной вклад в дифференциальную нелинейность дает учет разброса элементов старшего емкостного сегмента. Дополнительный учет разброса элементов младшего резистивного сегмента дает вклад не более 12 % и падает с ростом разрядности. Для наименьшей рассматриваемой разрядности ($N = 8$) вклад разброса младшего сегмента в интегральную нелинейность сопоставим со вкладом старшего сегмента (до 50 %). С ростом разрядности вклад младшего

сегмента падает до 11 %. Таким образом, с учетом того, что σ_R больше σ_C приблизительно в 20 раз, влияние разброса младшего резистивного сегмента в нелинейность невелико.

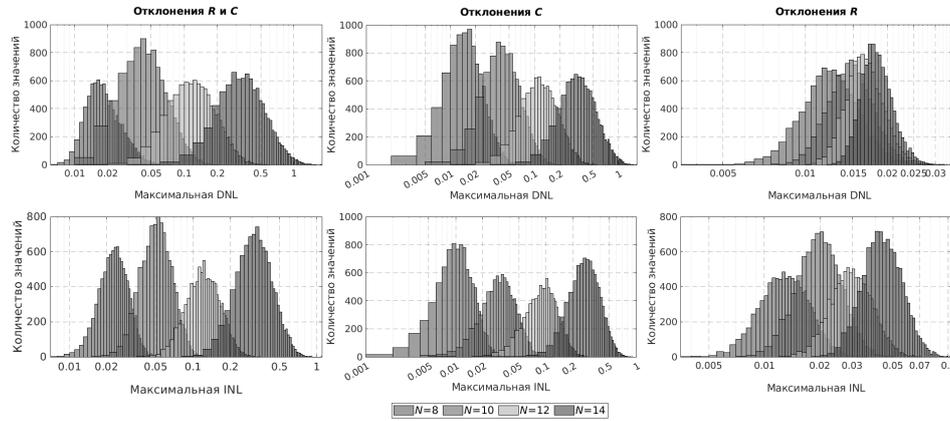
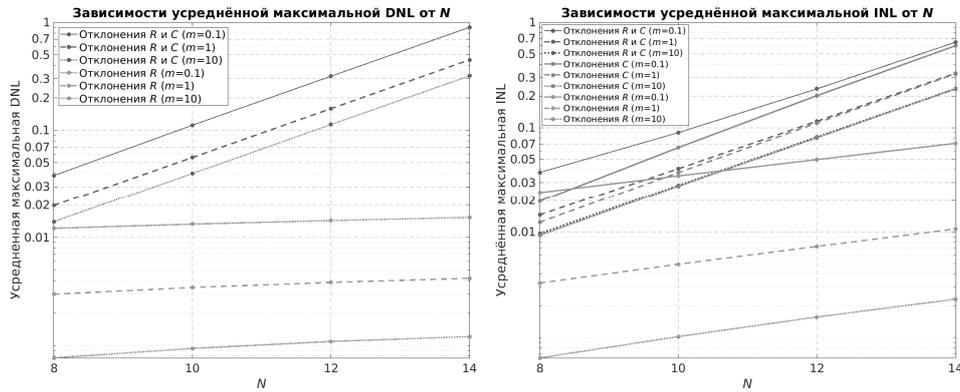
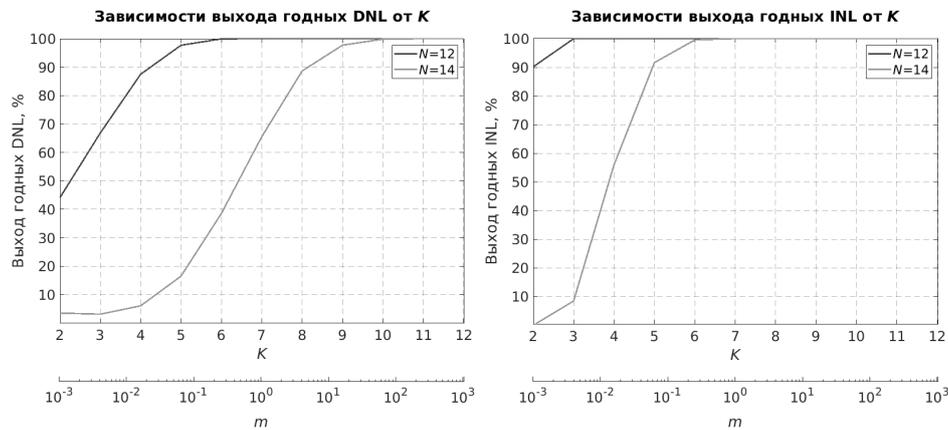


Рис. 3 – Гистограммы для максимальных DNL и INL

Fig. 3 – The histograms of maximum DNL and INL

На рис. 4 изображены зависимости усредненной по выборке максимальной DNL и INL соответственно от разрядности N . Кроме гомогенного случая, для которого $m = 1$, также представлены зависимости при двух других условиях: $m = 0,1$ и $m = 10$. Изменение коэффициента m осуществляется за счет изменения площади резисторов при зафиксированной площади конденсаторов. Аналогично построенным гистограммам рассмотрены четные разрядности ЦАП от 8 до 14. Согласно полученным результатам увеличение разрядности N приводит к ухудшению DNL и INL для всех рассмотренных случаев m . Заметно, что INL в большей степени подвержена влиянию отклонений резисторов в сравнении с DNL. В связи с тем, что вклад отклонений резисторов в DNL слаб, зависимости средней максимальной DNL с учетом емкостных отклонений очень близки к зависимостям, учитывающим оба типа отклонений (разница менее чем 1 %). Таким образом, на рис. 4 для DNL не показаны зависимости, учитывающие только отклонения конденсаторов. Увеличение m (что соответствует увеличению площади резисторов и снижению разрядности резистивного сегмента) приводит к улучшению обоих DNL и INL, так как конденсаторы в сравнении с резисторами менее подвержены влиянию отклонений элементов.

Рассмотрим влияние оптимальной разрядности емкостного сегмента $K_{\text{опт}}$ на выход годных DNL и INL с учетом разброса резисторов и конденсаторов. На рис. 5 приведены зависимости выхода годных DNL и INL от разрядности $K_{\text{опт}}$ при $N = 12$ и $N = 8$. На графиках также изображена соответствующая ось m в логарифмическом масштабе, значения на которой соответствуют оптимальной разрядности емкостного сегмента на оси $K_{\text{опт}}$. Для расчета выхода годных нелинейностей были выбраны пороговые значения, равные 0,5 МЗР и 1 МЗР для DNL и INL соответственно. Стоит отметить, что в диапазон рассматриваемых разрядностей K не включены значения, равные 1 и 13, так как одноразрядный сегмент не дает вклада в нелинейность.

Рис. 4 – Зависимости усредненных максимальных DNL и INL от N Fig. 4 – Dependences of mean maximum DNL and INL on N Рис. 5 – Зависимости выхода годных DNL и INL от K Fig. 5 – Dependences of DNL and INL yield on K

Согласно полученным зависимостям рост разрядности $K_{\text{опт}}$, соответствующий увеличению отношения площадей элементов m , приводит к улучшению выхода годных для обеих нелинейностей. Также при фиксированной разрядности емкостного сегмента $K_{\text{опт}}$ наблюдается ухудшение выхода годных с ростом разрядности ЦАП N , которое в рассматриваемом случае объясняется увеличением разрядности резистивного сегмента (более подверженного влиянию случайных ошибок).

Заключение

Цифроаналоговый преобразователь обеспечивает связь цифровой и аналоговой частей схемы, преобразуя входной цифровой код в выходной аналоговый сигнал – заряд, ток или напряжение. Объектом настоящей работы является гибридный RC-ЦАП, структура которого состоит из резисторов и конденсаторов, выполняющих роль взвешивающих элементов. Емкостный сегмент выполнен по бинарной архитектуре и управляется старшими значащими разрядами, в то время как резистивный сегмент имеет унарную архитектуру и управляется младшими

значащими разрядами. Рассматриваемая структура ЦАП выделяется за счет широкого диапазона выходного сигнала, обеспечиваемого выходным буфером и сниженным потреблением мощности. При этом такой ЦАП является высокоразрядным и обеспечивает высокую линейность характеристики преобразования.

Получено выражение для определения оптимальных разрядностей сегментов ЦАП в зависимости от отношения площадей элементов. Также в данной работе выполнен анализ влияния разброса элементов N -разрядного гибридного сегментного RC-ЦАП на DNL и INL. Для этой цели была разработана параметрическая математическая модель в среде MATLAB. Для моделирования резистивные и емкостные массивы сформировались с учетом влияния случайной ошибки.

Для минимизации площади ЦАП разрядности емкостного и резистивного сегментов должны выбираться близкими к оптимальному значению согласно полученному в работе выражению. При оптимальном выборе разрядностей сегментов и росте разрядности ЦАП нелинейность увеличивается. Для снижения нелинейности потребуется увеличение площади ЦАП либо за счет увеличения площади компонентов (резисторов и/или конденсаторов), либо за счет отказа от оптимального соотношения в пользу увеличения разрядности емкостного сегмента при сохранении той же площади компонентов.

При одинаковой разрядности сегментов, с учетом двадцатикратного отличия разброса резисторов и конденсаторов, вклад в нелинейность младшего резистивного сегмента оказывается невелик. Так как резистивный сегмент обрабатывает младшие разряды, то его влияние на DNL слабее, чем на INL (определяется переключением элементов с наибольшим весом, находящемся в старшем сегменте). В частности, при площади резистора, составляющей от 0,1 до 10 площадей конденсатора, вклад младшего резистивного сегмента в DNL на два порядка меньше, чем старшего емкостного. При увеличении разрядности и оптимальном выборе разрядности сегментов вклад младшего резистивного сегмента в INL снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yenuchenko M.S., Pilipko M.M., Morozov D.V.** A 10-bit segmented M-string DAC // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2018. – P. 265–268. – DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317081.
2. A 12-bit 200-ks/s SAR ADC with hybrid RC DAC / M.-R. Kim, Y.-O. Kim, Y.-S. Kwak, G.-C. Ahn // 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). – IEEE, 2014. – P. 185–188.
3. **Shahsavari S., Saberi M.** A highly linear 8-Bit M–2M digital-to-analog converter for neurostimulators // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2020. – Vol. 67 (6). – P. 989–993.
4. **Lee T.-C., Lin C.-H.** Nonlinear R-2R Transistor-Only DAC // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2010. – Vol. 57 (10). – P. 2644–2653.
5. **Seol H.-C., Hong S.-K., Kwon O.-K.** An area-efficient high-resolution resistor-string DAC with reverse ordering scheme for active matrix flat-panel display data driver ICs // Journal of Display Technology. – 2016. – Vol. 12 (8). – P. 828–834.
6. A 12-bit multi-channel R-R DAC using a shared resistor string scheme for area-efficient display source driver / D. Jung, Y. Jung, T. Yoo, D. Yoon, B. Jung, T.T. Kim, K. Baek // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2018. – Vol. 65 (11). – P. 3688–3697.
7. **Lin M.P.-H., Hsiao V.W.-H., Lin C.-Y.** Parasitic-aware sizing and detailed routing for binary-weighted capacitors in charge-scaling DAC // 2014 51st ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC). – IEEE, 2014. – P. 1–6.
8. **Li Zhe, Lu Yuxiao, Mo Tingting.** Calibration for split capacitor DAC in SAR ADC // 2013 IEEE 10th International Conference on ASIC. – IEEE, 2013. – P. 1–4.

9. **Raj B.B., Sreekuma D.** A low power area efficient 10-bit SAR ADC with parasitic insensitive capacitive DAC // 2017 International Conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS). – IEEE, 2017. – P. 1–4.
10. A 12bit 800MS/s and 1.37mW digital to analog converter (DAC) based on novel R-C technique / S. Mahdavi, R. Ebrahimi, A. Daneshdoust, A. Ebrahim // 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). – IEEE, 2017. – P. 163–166.
11. A 20MS/s 11-bit digital-to-analog converter using a combined capacitor and resistor network / M. Davidovic, A. Nemecek, G. Zach, H. Zimmermann // 2008 NORCHIP. – IEEE, 2008. – P. 85–88.
12. Area-efficient R-C DACs with low-offset push-pull output buffers for a 10-bit LCD source driver / H.-Y. Zheng, J.-H. Wang, C.-H. Tsai, C.-T. Chang, C.-C. Lee, C.-Y. Wang // 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – IEEE, 2009. – P. 1597–1600.
13. Low-power 13-bit DAC with a novel architecture in SA-ADC / T. Aspokeh, A. Amini, A. Baradaranrezaei, M. Yazdani // 2018 25th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and System" (MIXDES). – IEEE, 2018. – P. 165–168.
14. **Zeng T., Chen D.** An order-statistics based matching strategy for circuit components in data converters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2013. – Vol. 60 (1). – P. 11–24.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF MISMATCH ON NONLINEARITY IN HYBRID RC-DAC

Yenuchenko M.S., Kvashina N.V., Pilipko M.M.

St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

This paper is dedicated to the analysis of the effect of elements mismatch on the nonlinearity of N-bit hybrid segmented RC-digital-to-analog converter. In the structure of the hybrid digital-to-analog converter under consideration, a binary capacitive segment processes the most significant bits, whereas a unary resistive segment processes the least significant bits. Since the considered digital-to-analog converter is heterogenous, the elements of both segments differ by the type (resistors or capacitors) and area. This causes an optimal ratio of segments resolutions to shift in respect to the total DAC area minimization. Therefore, the goal of the current research is to obtain an expression for optimal segments resolutions in dependance on the ratio of unit capacitor and resistor areas. For this purpose, a parametric mathematical model of the considered converter has been developed in MATLAB. The elements arrays of both segments are influenced by random errors. The simulation of differential and integral nonlinearities has been carried out, which demonstrated a lower contribution of the resistive segment on nonlinearity, in contrast to the capacitive one. Besides, the increment of a capacitive segment resolution improves the yield of both nonlinearities.

Keywords: digital-to-analog converter, hybrid RC-DAC, mismatch, capacitive, resistive, nonlinearity, DNL, INL.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-32-42

REFERENCES

1. Yenuchenko M.S., Pilipko M.M., Morozov D.V. A 10-bit segmented M-string DAC. 2018 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2018, pp. 265–268. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317081.
2. Kim M.-R., Kim Y.-O., Kwak Y.-S., Ahn G.-C. A 12-bit 200-kS/s SAR ADC with hybrid RC DAC. 2014 *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS)*. IEEE, 2014, pp. 185–188.

3. Shahsavari S., Saberi M. A highly linear 8-Bit M–2M digital-to-analog converter for neurostimulators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2020, vol. 67 (6), pp. 989–993.
4. Lee T.-C., Lin C.-H. Nonlinear R-2R Transistor-Only DAC. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2010, vol. 57 (10), pp. 2644–2653.
5. Seol H.-C., Hong S.-K., Kwon O.-K. An area-efficient high-resolution resistor-string DAC with reverse ordering scheme for active matrix flat-panel display data driver ICs. *Journal of Display Technology*, 2016, vol. 12 (8), pp. 828–834.
6. Jung D., Jung Y., Yoo T., Yoon D., Jung B., Kim T.T., Baek K. A 12-bit multi-channel R-R DAC using a shared resistor string scheme for area-efficient display source driver. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2018, vol. 65 (11), pp. 3688–3697.
7. Lin M.P.-H., Hsiao V.W.-H., Lin C.-Y. Parasitic-aware sizing and detailed routing for binary-weighted capacitors in charge-scaling DAC. *2014 51st ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference (DAC)*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
8. Li Zhe, Lu Yuxiao, Mo Tingting. Calibration for split capacitor DAC in SAR ADC. *2013 IEEE 10th International Conference on ASIC*. IEEE, 2013, pp. 1–4.
9. Raj B.B., Sreekuma D. A low power area efficient 10-bit SAR ADC with parasitic insensitive capacitive DAC. *2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
10. Mahdavi S., Ebrahimi R., Daneshdoust A., Ebrahim A. A 12bit 800MS/s and 1.37mW Digital to Analog Converter (DAC) based on novel R-C technique. *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*. IEEE, 2017, pp. 163–166.
11. Davidovic M., Nemecek A., Zach G., Zimmermann H. A 20MS/s 11-bit digital-to-analog converter using a combined capacitor and resistor network. *2008 NORCHIP*. IEEE, 2008, pp. 85–88.
12. Zheng H.-Y., Wang J.-H., Tsai C.-H., Chang C.-T., Lee C.-C., Wang C.-Y. Area-efficient R-C DACs with low-offset push-pull output buffers for a 10-bit LCD source driver. *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. IEEE, 2009, pp. 1597–1600.
13. Aspokeh T., Amini A., Baradaranrezaei A., Yazdani M. Low-power 13-bit DAC with a novel architecture in SA-ADC. *2018 25th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and System" (MIXDES)*. IEEE, 2018, pp. 165–168.
14. Zeng T., Chen D. An order-statistics based matching strategy for circuit components in data converters. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, vol. 60 (1), pp. 11–24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Енученко Михаил Сергеевич – родился в 1990 году, канд. техн. наук, доцент, Высшая школа электроники и микросистемной техники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29/2. E-mail: mixeme@outlook.com).

Yenuchenko Mikhail Sergeevich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), in Electronics & Engineering, associate professor, Higher School of Electronics and Micro-Electro-Mechanical Systems, St. Petersburg Polytechnic University. His research interests are currently focused on digital-to-analog converters (DAC). He is the author of 47 scientific papers. (Address: 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mixeme@outlook.com).



Квашина Наталья Владимировна – родилась в 1999 году, инженер, ассистент, Высшая школа электроники и микросистемной техники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), цифровая калибровка ЦАП. Опубликовано 7 научных работ. (195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29/2. E-mail: kvashina.nv@gmail.com).

Kvashina Natalya Vladimirovna (b. 1999) – engineer, assistant professor, Higher School of Electronics and Micro-Electro-Mechanical Systems, St. Petersburg Polytechnic University. Her research interests are currently focused on digital-to-analog converters (DAC) and digital calibration of DAC. She is the author of 10 scientific papers. (Address: 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kvashina.nv@gmail.com).



Пилипко Михаил Михайлович – родился в 1984 году, канд. техн. наук, доцент, доцент, Высшая школа электроники и микросистемной техники, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), цифровая и аналоговая схемотехника. Опубликовано 76 научных работ. (Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29/2. E-mail: mpilipko@mail.ru).

Pilipko Mikhail Mikhailovich (b. 1984) – Candidate of Sciences (Eng.), in Electronics & Engineering, associate professor, Higher School of Electronics and Micro-Electro-Mechanical Systems, St. Petersburg Polytechnic University. His research interests are currently focused on analog, digital, and mixed-signal circuits, analog-to-digital converters (ADC), digital-to-analog converters (DAC), and digital and analog circuit engineering. He is the author of 76 scientific papers. (Address: 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mpilipko@mail.ru).

*Статья поступила 15 декабря 2023 г.
Received December 15, 2023*

To Reference:

Yenuchenko M.S., Kvashina N.V., Pilipko M.M. Analiz vliyaniya otklonenii na nelineinost' v gibridnom RC-TsAP [Analysis of the effect of mismatch on nonlinearity in hybrid RC-DAC]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 32–42. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-32-42.

УДК 621.396.96

СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОШИБОК УСТАНОВКИ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ ИМИТАТОРАХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В. Киселев, А.В. Таюров

Новосибирский государственный технический университет

Получены упрощенные формулы для оценки погрешности установки углового положения кажущегося центра излучения в матричном имитаторе. Для этого использована аппроксимация функции ошибки. Показано, что известная формула для расчета ошибки при имитации радиолокационных отражений от точечных целей, при использовании для нахождения статистических характеристик шумов координат распределенных целей, требует упрощений. В этом случае функция ошибки может быть разделена на четыре участка, в пределах которых допускается ее аппроксимация полиномами первой или второй степени. При этом функция ошибки обладает косой симметрией, что позволяет анализировать лишь два участка, а результаты распространить на четыре. В качестве способа поиска оптимального разбиения на участки применен метод численного перебора. Для типовых форм главного лепестка диаграммы направленности антенны радиолокационной станции получены коэффициенты аппроксимирующих полиномов методом симплекса Нелдера–Мида. Показано, что использование аппроксимации позволяет получить аналитические выражения для моментов ошибки установки углового положения кажущегося центра излучения. В частности приведены соотношения для нахождения математического ожидания ошибки.

Ключевые слова: матричный имитатор, ошибка установки углового положения, кажущийся центр излучения, имитационное моделирование, шумы координат.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53

Введение

Большое число объектов радиолокационных измерений не может рассматриваться как точечные цели [1]. Их распределенность приводит к специфическим явлениям, в частности их угловое положение, оцененное методами радиолокации, становится случайным [2]. Результат его измерения представляет собой случайный процесс, называемый шумами угловых координат (далее сокращенно ШК – шумы координат) [3]. При имитационном моделировании эти шумы должны воспроизводиться с заданной точностью [4].

Наиболее современным средством их моделирования являются так называемые матричные имитаторы (сокращенно МИ) [5, 6]. К сожалению, их работа, точнее установка углового положение объектов, сопряжена с ошибками, механизм возникновения которых и их связь с параметрами МИ, диаграммой направленности антенны РЛС (сокращенно ДНА РЛС), рассмотрены в [7, 8]. При этом полученное в [9] соотношение для величины ошибок достаточно сложно:

$$\chi(\xi) = -\operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 + (1-\xi^2)3P^2 + (1-2\xi^2 + \xi^4)3P + (\xi^3 - \xi)(1+j\sqrt{3})}} \right], \quad (1)$$

где $P = \frac{1}{\delta^2} \frac{r_2}{6r_4}$; r_2, r_4 – коэффициенты полинома, аппроксимирующего одномерную диаграмму направленности антенны РЛС:

$$F(\alpha) = r_0 + r_1(\alpha - \alpha_a) + r_2(\alpha - \alpha_a)^2 + r_3(\alpha - \alpha_a)^3 + r_4(\alpha - \alpha_a)^4;$$

$$r_0 = F(\alpha_a); \quad r_1 = \left. \frac{dF(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{d^2F(\alpha)}{d\alpha^2} \right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$$r_3 = \left. \frac{1}{6} \frac{d^3F(\alpha)}{d\alpha^3} \right|_{\alpha=\alpha_a}; \quad r_4 = \left. \frac{1}{24} \frac{d^4F(\alpha)}{d\alpha^4} \right|_{\alpha=\alpha_a};$$

$\alpha_a = 0$ – точка, в окрестности которой производится аппроксимация ДНА; δ – угол, образованный центром МИ и излучателем МИ, далее – разнос излучателей МИ; $\xi_{\text{изм}}$, ξ – измеренное и требуемое положение кажущегося центра излучения (КЦИ); j – мнимая единица.

Это затрудняет его использование для оценки статистических характеристик имитируемых сигналов, в частности при проверках их адекватности.

1. Постановка задачи

Действительно, даже при вычислении первого момента ошибки имеем

$$M_1(m, \nu) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} \chi(\xi) W(\xi, m, \nu) d\xi, \quad (2)$$

где плотность вероятности распределения ШК [3]

$$W(\xi, m, \nu) = \frac{\nu}{2(1 + \nu^2(\xi - m)^2)^{3/2}};$$

m – математическое ожидание; ν – параметр, обратно пропорциональный ширине функции распределения; ξ_{\max} – максимально возможное удаление КЦИ, имеем:

$$M_1(m, \nu) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{\xi_{\max}} \left(-\operatorname{Re} \left[\sqrt[3]{\sqrt{P^3 + (1 - \xi^2)3P^2 + (1 - 2\xi^2 + \xi^4)3P + (\xi^3 - \xi) \times}} \right. \right. \\ \left. \left. \times (1 + j\sqrt{3}) \right] W(\xi, m, \nu) \right) d\xi.$$

Поэтому актуальна задача упрощения соотношения (1).

Цель работы – получить упрощенные выражения для расчета ошибок установки углового положения кажущегося центра излучения в матричном имитаторе.

2. Решение

На рис. 1 представлен типичный пример расчета функции ошибки, вычисленной по (1) для соотношения разноса излучателя и ширины ДНА $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, где $\alpha_{0,5}$ – полуширина ДНА по уровню половинной мощности. Видно, что она:

- кососимметрична;
- в пределах матрицы ($-1 \leq \xi \leq 1$) существенно нелинейна;
- при значительных выходах за ее пределы близка к линейной.

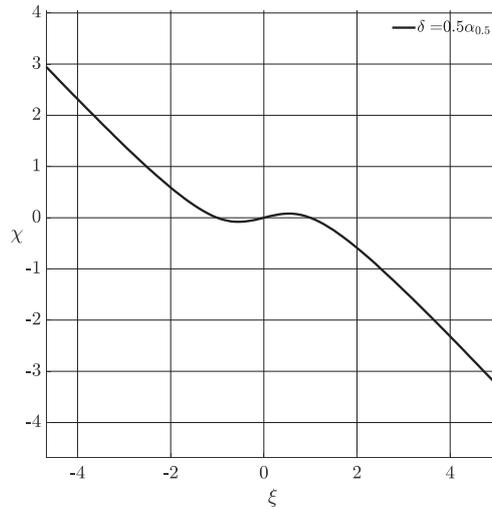


Рис. 1 – Пример зависимости ошибки пеленга от заданного положения КЦИ для $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Fig. 1 – An example of the dependence of the bearing error on a given position of the apparent radiation center (ARC) for $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Тогда в качестве аппроксимирующей ее функции логично рассмотреть:

$$\chi(\xi) = \chi_1(\xi) + \chi_2(\xi) + \chi_3(\xi) + \chi_4(\xi),$$

где $\chi_1(\xi), \chi_2(\xi), \chi_3(\xi), \chi_4(\xi)$ – функции, аппроксимирующие $\chi(\xi)$ на участках $-\xi_{\max} \leq \xi \leq -\xi_{\text{ТР}}, -\xi_{\text{ТР}} \leq \xi \leq 0, 0 \leq \xi \leq \xi_{\text{ТР}}, \xi_{\text{ТР}} \leq \xi \leq \xi_{\max}$ (рис. 2); $-\xi_{\text{ТР}}, \xi_{\text{ТР}}$ – точки перехода.

Найдем функции $\chi_1(\xi), \chi_2(\xi), \chi_3(\xi), \chi_4(\xi)$:

$$\chi_1(\xi) = a_0 + a_1\xi; \quad \chi_2(\xi) = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2;$$

$$\chi_3(\xi) = c_0 + c_1\xi + c_2\xi^2; \quad \chi_4(\xi) = d_0 + d_1\xi.$$

Причем в силу косой симметрии функции ошибки коэффициенты аппроксимации соотносятся как

$$a_0 = -d_0; \quad a_1 = d_1; \quad b_0 = -c_0; \quad b_1 = c_1; \quad b_2 = -c_2,$$

тогда

$$\chi_1(\xi) = a_0 + a_1\xi, \quad \chi_2(\xi) = b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2,$$

$$\chi_3(\xi) = -b_0 + b_1\xi - b_2\xi^2, \quad \chi_4(\xi) = -a_0 + a_1\xi.$$

Неизвестные коэффициенты аппроксимации a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 зависят как от ДНА сканирующей антенны, базы матрицы, так и от координат точек перехода.

Проверим предложенную версию о допустимости аппроксимации ошибки выбранными полиномами. Для этого воспользуемся численными методами.

Рассмотрим три значения отношения разности излучателей к ширине ДНА (0,1, 0,5 и 1).

Для каждого из них проведем поиск коэффициентов a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 и положения точки перехода $\xi_{\text{ТР}}$. Для этого интервал $0 \leq \xi \leq \xi_{\text{max}}$ разбивается на n точек, для каждой из них находится ошибка пеленга по (1) и с помощью выбранного аппроксимирующего полинома.

Вспользуемся двумя критериями качества аппроксимации.

1. Максимальное значение ошибки аппроксимации (max error (ME)), нормированное к значению функции (1) в точке максимума ошибки для $0 \leq \xi \leq \xi_{\text{ТР}}$ (т. е. для квадратичного участка):

$$\gamma_{ME}(b_0, b_1, b_2) = \frac{\max |b_0 + b_1 \xi_{i_{\text{max}}} + b_2 \xi_{i_{\text{max}}}^2 - \chi_{i_{\text{max}}}|}{\chi_{i_{\text{max}}}},$$

где i_{max} – индекс точки с максимальным отклонением аппроксимирующей функции от аппроксимируемой; $i = 1, \dots, n$, и

$$\gamma_{ME}(a_0, a_1) = \frac{\max |a_0 + a_1 \xi_{i_{\text{max}}} - \chi_{i_{\text{max}}}|}{\chi_{i_{\text{max}}}}$$

для линейного участка.

2. Среднеквадратическое значение ошибки (СКО), нормированное к значению функции (1) в точке с максимальной ошибкой аппроксимации:

$$\gamma_{\text{СКО}}(b_0, b_1, b_2) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 \xi_i + b_2 \xi_i^2 - \chi_i)^2}{n}} / \chi_{i_{\text{max}1}};$$

$$\gamma_{\text{СКО}}(a_0, a_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_0 + a_1 \xi_i - \chi_i)^2}{n}} / \chi_{i_{\text{max}2}},$$

где $\chi_{i_{\text{max}1}}$ и $\chi_{i_{\text{max}2}}$ – значение функции (1) в точке с максимальным отклонением аппроксимирующей функции от аппроксимируемой для квадратичного и линейного участка соответственно.

Точку перехода $\xi_{\text{ТР}}$ найдем из условия:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (b_0 + b_1 \xi_{\text{ТР}} + b_2 \xi_{\text{ТР}}^2 - \chi(\xi_{\text{ТР}}))^2}{n_1}} / \chi_{i_{\text{max}1}} -$$

$$- \sqrt{\frac{\sum_{i=n_1}^n (a_0 + a_1 \xi_{\text{ТР}} - \chi(\xi_{\text{ТР}}))^2}{n - n_1}} / \chi_{i_{\text{max}2}} \rightarrow \min.$$

Поиск положения точки перехода осуществлялся методом перебора, а весовых коэффициентов методом симплекса Нелдера–Мида [10] с точностью по умолчанию 10^{-6} .

Отношения коэффициентов аппроксимации ДНА r_2 / r_4 для наиболее распространенных функций, используемых при описании игольчатых ДНА [11], приведены в табл. 1.

Аргументы функций подобраны таким образом, чтобы ширина различных по форме ДНА совпадала на уровне 0,707 и равнялась $2\alpha_{0,5}$.

Таблица 1 / Table 1

Соответствие коэффициентов аппроксимации и формы ДНА

The correspondence of the approximation coefficients and the shape of the antenna radiation pattern (ARP)

ДНА $F(\alpha)$	$r_2(2\alpha_{0,5})^2$	$r_4(2\alpha_{0,5})^4$	$(r_2 / r_4) / (2\alpha_{0,5})^2$
$\cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$	-1,2342	0,2539	-4,8615
$\cos^2(1,144\alpha / 2\alpha_{0,5})$	-1,3087	0,5709	-2,2923
$\cos^3(0,943\alpha / 2\alpha_{0,5})$	-1,3339	0,6919	-1,9278
$\text{sinc}(2,784\alpha / 2\alpha_{0,5})$	-1,2918	0,5006	-2,5804
$\text{sin} c^2(2,004\alpha / 2\alpha_{0,5})$	-1,3387	0,7168	-1,8675
$\exp(-(1,178\alpha / 2\alpha_{0,5})^2)$	-1,3877	0,9628	-1,4413

Из приведенных в таблице данных видно, что минимальное значение модуля P имеет место для ДНА вида гауссова экспонента, а максимальное – для ДНА вида \cos .

Именно этими ДНА и ограничим дальнейшие исследования.

Поиск коэффициентов a_0, a_1, b_0, b_1, b_2 проводился для двух значений числа точек разбиения – для ста и тысячи. Сравнение полученных результатов (табл. 2) показало, что увеличение числа разбиений со 100 до 1000 (результаты для 1000 точек указаны в таблице в скобках) в целом не приводит к существенному увеличению точности аппроксимации при ее оценке по среднеквадратичному отклонению и минимаксному критерию. Поэтому количество разбиений было ограничено 1000.

Таблица 2 / Table 2

Оценка качества аппроксимации (1) для 100 и 1000 точек по относительным значениям ошибок аппроксимации (их максимальному (МЕ) значению и среднеквадратическому (СКО))

Estimation of the approximation quality (1) for 100 and 1000 points based on the relative values of approximation errors (their maximum (ME) value and standard mean square (RMS))

δ		Линейный участок		Квадратичный участок	
		МЕ	СКО	МЕ	СКО
0,1 $\alpha_{0,5}$	cos	-0,012475 (-0,069189)	-0,008543 (-0,047011)	-0,011145 (-0,012729)	-0,007914 (-0,009026)
	exp	-0,189440 (-0,005086)	-0,124710 (-0,003441)	-0,009926 (-0,030756)	-0,007360 (-0,02138)

Окончание табл. 2 / The end Table 2

δ		Линейный участок		Квадратичный участок	
		МЕ	СКО	МЕ	СКО
$0,5\alpha_{0,5}$	cos	-0,016716 (-0,006909)	-0,011423 (-0,004704)	-0,011859 (-0,027933)	-0,008605 (-0,019585)
	exp	-0,066028 (-0,063941)	-0,044917 (-0,043043)	-0,055347 (-0,058507)	-0,039953 (-0,040588)
$\alpha_{0,5}$	cos	-0,008449 (-0,009417)	-0,005797 (-0,006403)	-0,066812 (-0,064867)	-0,047560 (-0,045710)
	exp	0,992980 (0,464960)	0,538270 (0,280360)	0,002627 (0,002963)	0,002732 (0,002013)

Результаты расчета искомых коэффициентов для рассмотренных исходных данных представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты аппроксимации ошибки пеленга и точка перехода

The coefficients of approximation of the bearing error and the transition point

δ		a_0	a_1	b_0	b_1	b_2	ξ_{TP}
$0,1\alpha_{0,5}$	cos	-0,539451	-0,901847	0,000604	0,068430	0,453163	0,93
	exp	-0,317387	-0,940941	0,001001	0,081822	0,858402	0,45
$0,5\alpha_{0,5}$	cos	-0,543214	-0,903123	0,001073	0,129766	0,510080	0,87
	exp	-0,355688	-0,961744	-0,008299	0,203279	1,003257	0,57
$\alpha_{0,5}$	cos	-0,615814	-0,933019	-0,007173	0,319711	0,675233	0,93
	exp	-0,386140	-0,904502	0,083939	1,413105	4,082365	0,12

В качестве примера, на рис. 2 показана кривая, полученная по (1) и результаты ее аппроксимации.

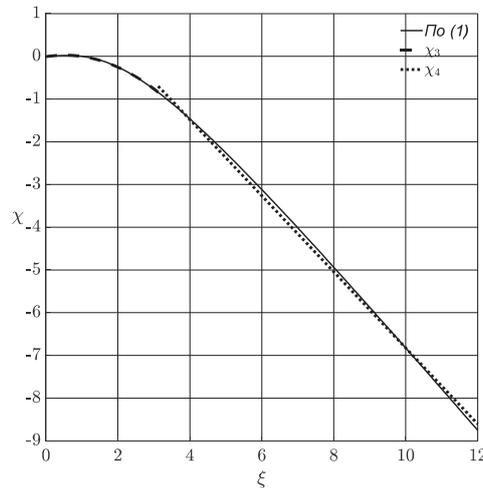


Рис. 2 – Пример аппроксимации ошибки для $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Fig. 2 – An example of error approximation for $\delta = 0,5\alpha_{0,5}$, $F(\alpha) = \cos(1,5711\alpha / 2\alpha_{0,5})$

Из представленных результатов видно, что, как и предполагалось, выбранные аппроксимации обеспечивают высокую точность.

3. Использование полученных соотношений для вычисления математического ожидания ошибки установки положения КЦИ

В качестве примера использования полученного соотношения рассмотрим вычисление математического ожидания ошибки установки углового положения КЦИ (2):

$$M_1(m, v) = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{ТР}}} \chi_1(\xi)W(\xi, m, v) d\xi + \int_{\xi=-\xi_{\text{ТР}}}^0 \chi_2(\xi)W(\xi, m, v) d\xi + \\ + \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{ТР}}} \chi_3(\xi)W(\xi, m, v) d\xi + \int_{\xi=\xi_{\text{ТР}}}^{\xi_{\max}} \chi_4(\xi)W(\xi, m, v) d\xi.$$

Подставив аппроксимирующую функцию, получим:

$$M_1 = M_{11} + M_{12} + M_{13} + M_{14};$$

$$M_{11} = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{ТР}}} \chi_1(\xi)W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=-\xi_{\max}}^{-\xi_{\text{ТР}}} (a_0 + a_1\xi)W(\xi, m, v) d\xi = \\ = \frac{1}{2v\sqrt{v^2(m + \xi_{\text{ТР}})^2 + 1}\sqrt{v^2(m + \xi_{\max})^2 + 1}} \left((m + \xi_{\max})(a_1m + a_0)v^2 + a_1 \right) \times \\ \times \sqrt{v^2(m + \xi_{\text{ТР}})^2 + 1} - \left((m + \xi_{\text{ТР}})(a_1m + a_0)v^2 + a_1 \right) \sqrt{v^2(m + \xi_{\max})^2 + 1}; \\ M_{12} = \int_{\xi=-\xi_{\text{ТР}}}^0 \chi_2(\xi)W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=-\xi_{\text{ТР}}}^0 (b_0 + b_1\xi + b_2\xi^2)W(\xi, m, v) d\xi = \\ = - \frac{\left(-b_2 \left(\arcsin h(v(\xi_{\text{ТР}} + m)) - \arcsin h(mv) \right) \right)}{2v^2 \sqrt{(\xi_{\text{ТР}} + m)^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 m^2 + 1}} \times \\ \times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + v \left(mv^2 (b_2 m^2 + b_1 m + b_0) + b_2 m + b_1 \right) \sqrt{(\xi_{\text{ТР}} + m)^2 v^2 + 1} - \\ - v \sqrt{v^2 m^2 + 1} \left(v^2 (\xi_{\text{ТР}} + m) (b_2 m^2 + b_1 m + b_0) + b_2 m - b_2 \xi_{\text{ТР}} + b_1 \right); \\ M_{13} = \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{ТР}}} \chi_3(\xi)W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=0}^{\xi_{\text{ТР}}} (-b_0 + b_1\xi - b_2\xi^2)W(\xi, m, v) d\xi = \\ = - \frac{\left(-b_2 \left(\arcsin h(v(-\xi_{\text{ТР}} + m)) - \arcsin h(mv) \right) \right)}{2v^2 \sqrt{(-\xi_{\text{ТР}} + m)^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 m^2 + 1}} \times$$

$$\begin{aligned}
& \times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + v \left(m v^2 (b_2 m^2 - b_1 m + b_0) + b_2 m - b_1 \right) \sqrt{(-\xi_{\text{TP}} + m)^2 v^2 + 1} - \\
& - v \left(v^2 (-\xi_{\text{TP}} + m) (b_2 m^2 - b_1 m + b_0) + b_2 m + b_2 \xi_{\text{TP}} - b_1 \right) \sqrt{v^2 m^2 + 1}; \\
M_{14}(m, v) &= \int_{\xi=\xi_{\text{TP}}}^{\xi_{\text{max}}} \chi_4(\xi) W(\xi, m, v) d\xi = \int_{\xi=\xi_{\text{TP}}}^{\xi_{\text{max}}} (-a_0 + a_1 \xi) W(\xi, m, v) d\xi = \\
&= \frac{\left((m - \xi_{\text{max}}) (-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \right)}{2v \sqrt{v^2 (m - \xi_{\text{TP}})^2 + 1} \sqrt{v^2 (m - \xi_{\text{max}})^2 + 1}} \times \\
& \times \sqrt{v^2 (m - \xi_{\text{TP}})^2 + 1} - ((m - \xi_{\text{TP}})) (-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \sqrt{v^2 (m - \xi_{\text{max}})^2 + 1}.
\end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned}
M_1(m, v) &= \\
&= - \left(\left(\left(\left(\left(\left(2b_2 \left(\arcsin h(mv) - \frac{\arcsin h(v(m - \xi_{\text{TP}}))}{2} - \frac{\arcsin h(v(m + \xi_{\text{TP}}))}{2} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \times \\
& \times \sqrt{v^2 m^2 + 1} + 2 \left((b_2 m^2 + b_0) v^2 + b_2 \right) m v \sqrt{v^2 (m + \xi_{\text{TP}})^2 + 1} + \sqrt{v^2 m^2 + 1} \times \\
& \times \left((-b_2 m^2 + (a_1 - b_1) m + a_0 - b_0 (m + \xi_{\text{TP}}) v^2 - (b_2 m + b_2 \xi_{\text{TP}} + a_1 - b_1)) v \right) \times \\
& \quad \times \sqrt{1 + (m + \xi_{\text{max}})^2 v^2} - \sqrt{m^2 v^2 + 1} \sqrt{1 + (m + \xi_{\text{TP}})^2 v^2} \times \\
& \quad \times v \left((m + \xi_{\text{max}}) (a_1 m + a_0) v^2 + a_1 \right) \times \\
& \times \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{\text{TP}})^2} + v \sqrt{1 + v^2 m^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\text{TP}})^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\text{max}})^2} \times \\
& \times \left((m - \xi_{\text{TP}}) \left(-b_2 m^2 + (-a_1 + b_1) m + a_0 - b_0 \right) v^2 - b_2 m - b_2 \xi_{\text{TP}} - a_1 + b_1 \right) \times \\
& \quad \times \sqrt{1 + (m - \xi_{\text{max}})^2 v^2} - \sqrt{m^2 v^2 + 1} \sqrt{v^2 (m + \xi_{\text{TP}})^2 + 1} \times \\
& \times \left((m - \xi_{\text{max}}) (-a_1 m + a_0) v^2 - a_1 \right) \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{\text{TP}})^2} v \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\text{max}})^2} \Big/ \\
& \quad \Big/ \left(2v^2 \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\text{max}})^2} \sqrt{1 + v^2 (m + \xi_{\text{TP}})^2} \times \right. \\
& \quad \left. \times \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{\text{TP}})^2} \sqrt{1 + v^2 m^2} \sqrt{1 + v^2 (m - \xi_{\text{max}})^2} \right).
\end{aligned}$$

Использование аппроксимации позволило получить аналитическую зависимость.

4. Заключение

1. Зависимость ошибки установки углового положения КЦИ может быть разбита на четыре участка, в пределах каждого из которых допустима ее аппроксимация полиномами первой или второй степени.

2. В целом в данной работе получено упрощенное выражение, позволяющее оценить ошибки установки углового положения КЦИ, возникающие в матричном имитаторе из-за замещения излучающей точки несколькими (двумя) неразрешаемыми излучателями.

3. Полученные результаты могут быть использованы для непосредственного вычисления ошибки, а также ее моментов. При этом полученные упрощения позволяют получить аналитические выражения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. – 184 с.
2. Bahtiyar S. Target glint phenomenon analysis and evaluation of glint reduction techniques: M. S. – Middle East Technical University, 2012. – 87 p.
3. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.
4. Степанов М.А. Точность позиционирования кажущегося центра излучения в когерентном трехточечном матричном имитаторе // Вопросы радиоэлектроники. – 2015. – № 5. – С. 57–67.
5. McKenna J., Wayne D., McBride S. Multiple target, dynamic RF scene generator // AMTA 2016 Proceedings. – Austin, TX, 2016. – P. 319–324.
6. Патент № 2787576 Российская Федерация: № 2021131580: заявл. 28.10.2021: опубл. 11.01.2023, Бюл. № 2. Имитатор радиолокационных целей / Боков А.С., Марков Ю.В., Сорокин А.К.
7. Тырыкин С.В. Модели радиолокационных объектов, построенные из зависимых отражателей, и имитация эхосигналов на их основе: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.12.14. – Новосибирск, 2005. – 22 с.
8. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Искажения диаграмм направленности фазированных антенных решеток под влиянием периодических и флуктуационных помех // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.10.
9. Киселев А.В., Тауров А.В. Систематические ошибки установки углового положения в матричных имитаторах радиоэлектронной обстановки // Доклады АН ВШ РФ. – 2023. – № 4 (61). – С. 34–44 – DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.
10. Nelder J.A., Mead R. A Simplex method for function minimization // The Computer Journal. – 1965. – Vol. 7 (4). – P. 308–313. – DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.
11. Рекомендация МСЭ-R М.1851-1. Математические модели диаграмм направленности антенн радиолокационных систем радиоопределения для использования при анализе помех (2009–2018). – Женева, 2018. – С. 2–9.

RATIOS FOR ESTIMATING ERRORS IN SETTING THE ANGULAR POSITION IN MATRIX SIMULATORS OF AN ELECTRONIC ENVIRONMENT

Kiselev A.V., Tayurov A.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Simplified formulas have been obtained to estimate the error in setting the angular position of the apparent center of radiation in a matrix simulator. The approximation of the error function is used for this purpose. It is shown that the well-known formula for calculating the error in simula-

ting radar reflections from point targets, when used to find the statistical characteristics of noise coordinates of distributed targets, requires simplifications. In this case, the error function can be divided into four sections, within which its approximation by polynomials of the first or second degree is allowed. At the same time, the error function has an oblique symmetry, which makes it possible to analyze only two sections, and to extend the results to four. The numerical enumeration method is used as a way to find an optimal division into sections. For the typical shapes of the main lobe of the directional pattern of the radar antenna, the coefficients of the approximating polynomials were obtained by the Nelder-Meade simplex method. It is shown that the use of approximation makes it possible to obtain analytical expressions for the moments of error in setting the angular position of the apparent radiation center. In particular, the relations for finding the mathematical expectation of an error are given.

Keywords: matrix simulator, systematic error angular position setting, apparent radiation center, simulation modeling, glint.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53

REFERENCES

1. Shtager E.A. *Rasseyanie radiovoln na telakh slozhnoi formy* [Scattering of radio waves on bodies of complex shape]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 184 p.
2. Bahtiyar S. *Target glint phenomenon analysis and evaluation of glint reduction techniques*. M. S. Middle East Technical University, 2012. 87 p.
3. Ostrovityanov R.V., Basalov F.A. *Statisticheskaya teoriya radiolokatsii protyazhennykh tselei* [Statistical theory of extended objectives radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 232 p.
4. Stepanov M.A. Tochnost' pozitsionirovaniya kazhushchegosya tsentra izlucheniya v kogerentnom trekhtocheynom matrichnom imitatore [Positioning accuracy of the apparent center of radiation in the coherent three-point matrix simulator]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2015, no. 5, pp. 57–67.
5. McKenna J., Wayne D., McBride S. Multiple target, dynamic RF scene generator. *AMTA 2016 Proceedings*, Austin, TX, 2016, pp. 319–324.
6. Bokov A.S., Markov Yu.V., Sorokin A.K. *Imitator radiolokatsionnykh tselei* [Radiolocation target simulator]. Patent RF, no. 2787576, 2023.
7. Tyrykin S.V. *Modeli radiolokatsionnykh ob"ektov, postroennye iz zavisimykh ot-razhatelei, i imitatsiya ekhsignalov na ikh osnove*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Simulation of radar objects constructed from dependent reflectors and simulation of echo signals based on them. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2005. 22 p.
8. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Iskazheniya diagramm napravlenosti fazirovannykh antennykh reshetok pod vliyaniem periodicheskikh i fluktuatsionnykh pomekh [Distortion of the radiation patterns of phased antenna arrays under the influence of periodic and fluctuating noise]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*, 2021, no. 2. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.10.
9. Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sistematische oshibki ustanovki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Systematic errors in setting the angular position in matrix simulators of the radio-electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 4 (61), pp. 34–44. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-4-34-44.
10. Nelder J.A., Mead R. A Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 1965, vol. 7 (4), pp. 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308.
11. Rekomendatsiya MSE-R M.1851-1. *Matematicheskie modeli diagramm napravlenosti anten radiolokatsionnykh sistem radioopredeleniya dlya ispol'zovaniya pri analize pomekh* [Mathematical models of radiation patterns of antennas of radar detection systems for use in interference analysis]. (2009–2018). Zheneva, 2018, pp. 2–9.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Киселев Алексей Васильевич – родился в 1958 году, д-р техн. наук, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: имитационное моделирование сложной радиоэлектронной обстановки, радиолокация, радиосвязь. Имеет более 160 публикаций. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nil_rtu@mail.ru).

Kiselev Alexey Vasilevich (b. 1958) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on simulation of complex electronic environment, radar detecting and ranging, and radio communication. He is the author of over 160 scientific papers. (Address: 20, Kark Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nil_rtu@mail.ru).



Таюров Антон Викторович – родился в 1997 году, аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: математическое моделирование радиолокационных отражений, радиолокация, радиосвязь. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ya.antoha.rt@gmail.com).

Tayurov Anton Viktorovich (b. 1997) – postgraduate student at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of radar reflections, radar, and radio communication. He is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Kark Marx Av., Novosibirsk, 630073. Russia, E-mail: nil_rtu@ngs.ru).

*Статья поступила 15 апреля 2024 г.
Received April 15, 2024*

To Reference:

Kiselev A.V., Tayurov A.V. Sootnosheniya dlya otsenki oshibok ustanovki uglovogo polozheniya v matrichnykh imitatorakh radioelektronnoi obstanovki [Ratios for estimating errors in setting the angular position in matrix simulators of an electronic environment]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 43–53. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-43-53.

УДК 536.46

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ
ВОЛНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА
ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ****Е.В. Манжос, А.А. Коржавин***Институт химической кинетики и горения СО РАН
им. В.В.Воеводского (ИХКГ СО РАН)*

Рассмотрен один из процессов фильтрационного горения, а именно процесс фильтрационного горения газов. Подчеркнута его важность и практическая значимость. Показано текущее состояние исследований и выявлена необходимость изучения нестационарных процессов фильтрационного горения газа. В статье исследован один из нестационарных процессов фильтрационного горения газа – процесс формирования волны фильтрационного горения газа, возникающей при движении горящей газовой смеси через инертную пористую среду навстречу потоку горючей смеси. Этот процесс возникает при работе устройств, использующих фильтрационное горение газа: устройства для дожигания бедных газовых смесей, радиационные горелки и др. Проведено комплексное исследование этого процесса, включающее в себя математическое моделирование и экспериментальное исследование. Предложен метод обработки получаемых при эксперименте данных. Установлены факторы, влияющие на процесс формирования волны фильтрационного горения газа при ее инициировании открытым пламенем. Выявлено влияние на процесс зажигания и движения волны фильтрационного горения газа скорости подачи газовой смеси, теплопотерь от пористой среды во внешнюю среду, размера зерна пористой среды.

Ключевые слова: фильтрационное горение газа, формирование фильтрационной волны горения газа, комплексное исследование, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66

Введение

Одним из широко используемых в технических устройствах и технологических схемах различных производств является процесс фильтрационного горения газов (ФГГ), представляющий собой процесс распространения зоны газофазной экзотермической реакции в инертной пористой среде при фильтрационном подводе газообразных реагентов к зоне химического превращения [1].

В настоящее время ФГГ является сформировавшимся разделом науки о горении, изучающим горение газа в условиях теплового и гидродинамического взаимодействия с твердой фазой [2]. Изучены закономерности стационарных процессов ФГГ: построены модели, позволяющие объяснить экспериментально наблюдаемые явления и закономерности [3–5]. Проведена классификация режимов ФГГ [1, 4, 6]. Установлены пределы распространения волн горения [2, 4] и их параметрические зависимости. Исследованы особенности протекания химических превращений в процессах ФГГ [7].

ФГГ имеет широкий спектр практических применений: фильтрационные радиационные нагреватели дискового типа, очистка пористой среды от органических примесей методом встречных волн фильтрационного горения, термохимическая конверсия углеводородов в синтез-газ в режиме фильтрационного горения [7].

Изучаемые вопросы ФГГ – исследование нестационарных явлений, наблюдаемых при горении в порах [8], исследование неустойчивости фронта волны горения [9]. Помимо этих вопросов одной из существующих проблем ФГГ является необходимость выяснения и уточнения факторов, влияющих на процесс формирования волны ФГГ.

Такая проблема возникает при использовании пористых огнепреградителей при фильтрации через них горючего газа, например, сбросных газов угольных шахт [10, 11]. В этом случае формирование волны ФГГ при случайном воспламенении газа может привести к прогоранию огнепреградителя и распространению пламени в защищаемый объем. В связи с этим необходимо исследование процесса формирования волн ФГГ и знание управляющих параметров и параметрических зависимостей, влияющих на характер горения.

Удобным и информативным методом исследования механизмов и закономерностей нестационарных процессов ФГГ, позволяющим оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волны ФГГ, является метод математического моделирования [2, 12].

Математическое моделирование находит широкое применение, но, к сожалению, не всегда оправдывает ожидания. Сдерживающим фактором является сложность полного описания процессов горения, необходимость введения в расчеты большого количества параметров, достоверное определение которых возможно в большинстве случаев в процессе натуральных экспериментов.

Таким образом, из имеющихся методов исследований очевидно, что в настоящее время ни один из них по отдельности не обладает возможностью четкого предсказания указанных явлений. Более информативным будет объединение результатов отмеченных методов исследования: математического моделирования и экспериментального исследования.

1. Метод математического моделирования»

Для выяснения параметров и механизмов формирования волны горения было проведено численное моделирование. При этом для облегчения счета были сделаны упрощения: волна горения предполагалась плоской, эффекты искривления фронта пламени не учитывались. Моделирование проводилось для адиабатического случая.

Система уравнений, описывающая распространение одномерной нестационарной волны горения газа в химически инертной пористой среде приведена в работе [2]. Используемая при моделировании математическая модель включает в себя уравнения переноса тепла по газу (1), пористой среде (2), переноса массы недостающего компонента газовой смеси (3), сохранения полного количества вещества в потоке (4) и уравнение состояния (5):

$$\varepsilon \rho_g c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha_0 S_c (\theta - T) + Q \varepsilon \rho_g \eta W, \quad (1)$$

$$\rho_s (1 - \varepsilon) c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((1 - \varepsilon) \lambda_s \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \alpha_0 S_c (T - \theta) + 2 \frac{\alpha_w}{R_w} (T_0 - \theta), \quad (2)$$

$$\varepsilon \rho_g \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \rho_g D \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \varepsilon \rho_g \eta W, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon \rho_g v)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_g T = \text{const.} \quad (5)$$

Здесь T и θ – температуры газа и инертной пористой среды; η – относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси; v – скорость подачи газа; ρ_g и ρ_s – плотности газа и материала пористой среды; c_p и c_s – удельные теплоемкости газа и пористой среды; λ_g , λ_s – коэффициенты теплопроводности газа и пористой среды; ε – пористость; α_0 – коэффициент межфазного теплообмена; S_c – удельная поверхность пористой среды; D – коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси; $Q = c_p(T_b - T_0)$ – тепловой эффект реакции; T_b – адиабатическая температура горения газовой смеси; $W = k_0 \exp(-E/(RT))$ – скорость обобщенной одностадийной химической реакции, где k_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; α_w – коэффициент внешней теплоотдачи; R_w – радиус канала.

Граничные условия для системы (1)–(5) задаются в следующем виде. На левой границе трубы: $v = v_{inp}(t)$, $T = T_{inp}$, $\eta = \eta_{inp}$, где индексом «inp» помечены входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. На правой границе задаются «мягкие» краевые условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t = 0$): $v = v_0(x)$, $T = T_0(x)$,

$\theta = \theta_0(x)$, $\eta = \eta_0$. Зажигание моделируется заданием в начальный момент ступенчатого профиля температуры в газовой фазе с температурой, равной адиабатической температуре горения для заданной смеси.

На рис. 1 представлена схема моделируемой системы. В трубе диаметром D_t и длиной L находится пористая среда. Слева в трубу подается горючая газовая смесь (свежий газ). В начальный момент в свободной части трубы справа от пористой среды смесь поджигается. Если скорость течения газа ниже нормальной скорости горения смеси, пламя распространяется против течения и стабилизируется на поверхности пористой среды. Стабилизированный факел пламени постепенно прогревает пористую среду, и в какой-то момент времени пламя входит в нее, формируется волна ФГГ.

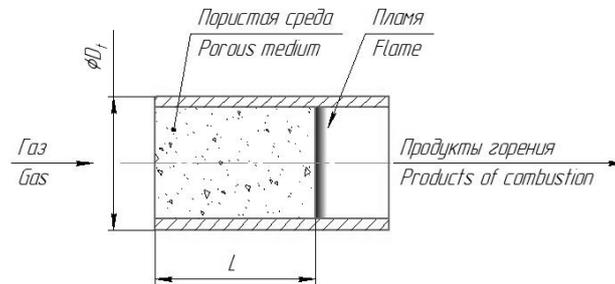


Рис. 1 – Схема моделируемой системы

Fig. 1 – The scheme of the simulated system

Для численного решения системы (1)–(5) использовалась конечно-разностная схема, основанная на лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Система уравнений (1)–(5) записывалась в векторном виде и решалась с помощью векторной прогонки. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой имело место в окрестности максимума функции тепловыделения. По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные В-сплайны.

Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями. В частности, были проведены тестовые расчеты по параметрическим зависимостям и абсолютным значениям нормальной скорости ламинарного пламени [13] (случай $\varepsilon = 1$, $\nu = 0$), по параметрическим зависимостям и значениям скорости распространения стационарных волн фильтрационного горения газа, которые сопоставлялись со значениями, рассчитанными в рамках стационарной аналитической модели фильтрационного горения газа [1]. Из нестационарных задач тестировалась кондуктивно-конвективная трансформация со временем первоначально ступенчатого температурного профиля пористой среды при отсутствии химической реакции ($Q = 0$).

Моделирование проводилось для стехиометрической метано-воздушной смеси со следующими параметрами [12, 14, 15]: теплоемкость $c_p = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), коэффициент теплопроводности $\lambda_g = 0,1$ Вт/(м · К), адиабатическая температура горения газа $T_b = 2320$ К. Значения параметров скорости эффективной химической реакции оценивались по результатам лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метано-воздушных смесей [16] и приняты равными $k_0 = 1 \cdot 10^{11}$ с⁻¹, $E = 2,26 \cdot 10^5$ Дж/моль. Программа рассчитывает в каждый момент профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации недостающего компонента газовой смеси и определяет координату пламени как точку максимума температуры газа.

В качестве пористой среды принят электрокорунд с характеристиками, приведенными в таблице. Длина участка с пористой средой $L = 180$ мм. Такая длина пористой среды существенно превышает толщину тепловой волны в пористой среде для типичных значений параметров, что позволяет интерпретировать полученные результаты как зажигание в полуограниченной пористой среде. Диаметр моделируемой трубы $D_t = 50$ мм.

2. Метод экспериментального исследования

Экспериментальное исследование проводилось с помощью установки, схема которой приведена на рис. 2.

Установка для исследования ФГГ состоит из горелки и системы регистрации характеристик волны горения. Горелка представляет собой вертикальную кварцевую трубу длиной 500 мм с толщиной стенки 2 мм и внешним диаметром 50 мм. Труба заполнялась пористой средой – зернистым электрокорундом. Использовались засыпки со средним размером диаметра зерен 4 и 5 мм, теплофизические свойства которых приведены в таблице.

Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха, расходы которых измерялись образцовыми ротаметрами. Газ с воздухом смешивался до входа в горелку в месте соединения подводов газа и воздуха и подавался в трубу снизу. Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой среды, формируя волну горения.

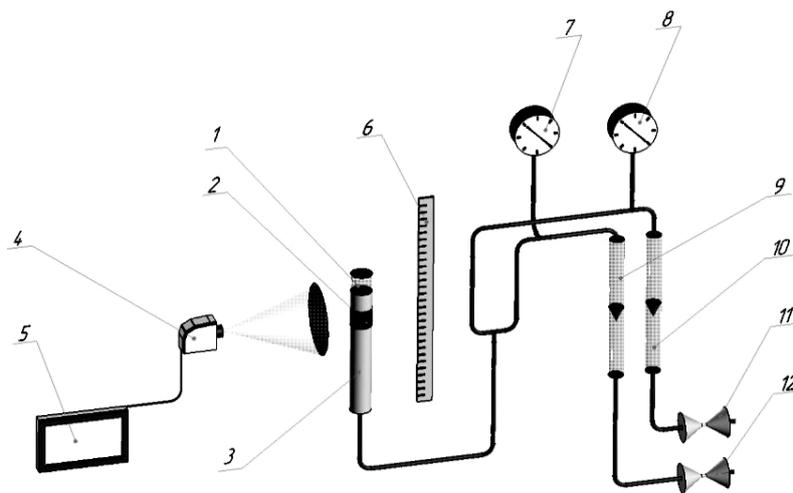


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки:

1 – кварцевая труба; 2 – зона горения; 3 – пористая среда; 4 – цифровая фотокамера; 5 – компьютер; 6 – линейка; 7, 8 – манометры воздуха и горючего газа; 9, 10 – расходомеры горючего газа и воздуха; 11, 12 – входы воздуха и горючего газа

Fig. 2 – The scheme of the experimental installation:

1 is a quartz pipe; 2 is a combustion zone; 3 is a porous medium; 4 is a digital camera; 5 is a computer; 6 is a ruler; 7, 8 are air and flammable gas pressure gauges; 9, 10 are flow meters of flammable gas and air; 11, 12 are air and combustible gas inlets

Теплофизические свойства пористой среды

Thermophysical properties of a porous medium

Свойства / Characteristics	Пористая среда (электрокорунд) / Porous medium (electrocorundum)
Плотность гранул, кг/м ³	3900 [12, 14]
Теплоемкость, Дж/(кг · К)	1000 [12, 14]
Теплопроводность, Вт/(м · К)	3,02 [12, 17]
Средний размер зерна, мм	4; 5
Пористость	0,56; 0,54

Визуально волна горения наблюдалась как плоская, ярко светящаяся зона, перемещающаяся по пористой среде, что показано на рис. 3.

Распространение волны горения регистрировали с помощью цифровой фотокамеры. Горелка с распространяющейся в ней волной ФГГ автоматически фотографировалась через равные промежутки времени (60 с) с сохранением изображений в памяти компьютера. Полученные снимки обрабатывались в прикладной программе, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась масштабная линейка. В результате обработки получались зависимости изменения координаты фронта волны горения от времени.

В качестве горючего газа использовался природный газ, содержащий 96 % метана, 1,5 % этана, 0,7 % пропана, 0,3 % бутана, 0,04 % углекислого газа и 1,0 % азота. Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха. Использовались стехиометрические смеси горючего газа и воздуха.

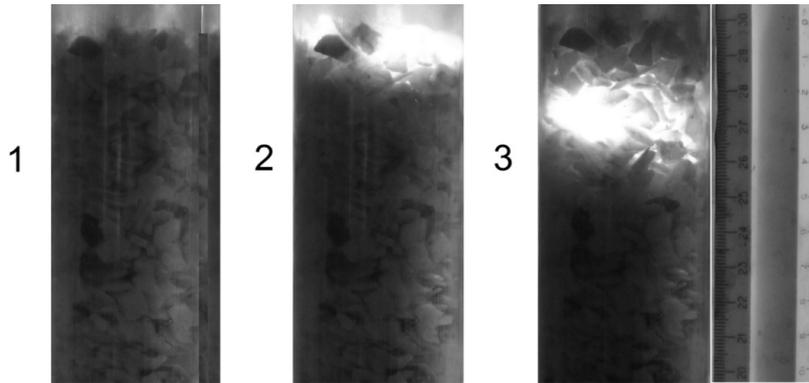


Рис. 3 – Формирование волны ФГГ. Стадии процесса формирования волны ФГГ:

1 – зажигание волны ФГГ; 2 – начало стационарного движения волны ФГГ;
3 – стационарное движение волны ФГГ

Fig. 3 – Formation of the FGC wave. Stages of the FGC wave formation process:

1 is the ignition of the FGC wave; 2 is the beginning of stationary motion of the FGC wave;
3 is a stationary motion of the FGC wave

Различие условий внешней теплоотдачи от трубы экспериментальной установки достигалось путем применения тепловой изоляции (каолиновой ваты толщиной ~20–30 мм), размещаемой вокруг трубы.

3. Результаты моделирования и экспериментов

Прежде всего для обработки получаемых при эксперименте данных было необходимо установить критерий момента времени формирования волны ФГГ. Пример определения характеристик процесса горения во время проведения эксперимента показан на рис. 4.

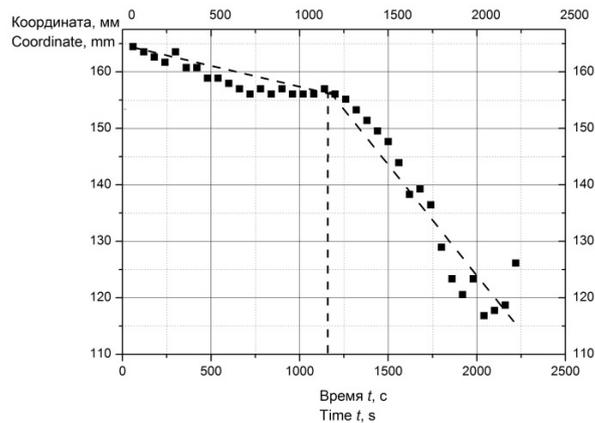


Рис. 4 – Пример определения характеристик процесса горения. Время зажигания волны ФГГ $t_{ign} = 1260$ с; скорость стационарной волны горения $u = 0,023$ мм/с; скорость подачи газовой смеси – 17,8 см/с. Средний диаметр зерна пористой среды $d_s = 4$ мм

Fig. 4 – An example of determining the characteristics of the combustion process. FGC wave ignition time is $t_{ign} = 1260$ s; velocity of the stationary combustion wave $u = 0,023$ mm/s; gas mixture supply speed is 17,8 cm/s. An average grain diameter of the porous medium $d_s = 4$ mm

Было принято считать временем зажигания t_{ign} промежуток времени, откладываемый от начала процесса до пересечения аппроксимирующих прямых, а скоростью перемещения фронта пламени – наклон второй прямой. Таким образом, на графике точками в виде квадратов показаны координаты фронта пламени при входе в пористую среду и формирование волны горения ФГГ, затем, после плавного спуска, также точками в виде квадратов – координаты фронта пламени в сформировавшейся волне горения.

После обработки данных экспериментов, согласно приведенному выше примеру, были получены зависимости, показанные на рис. 5.

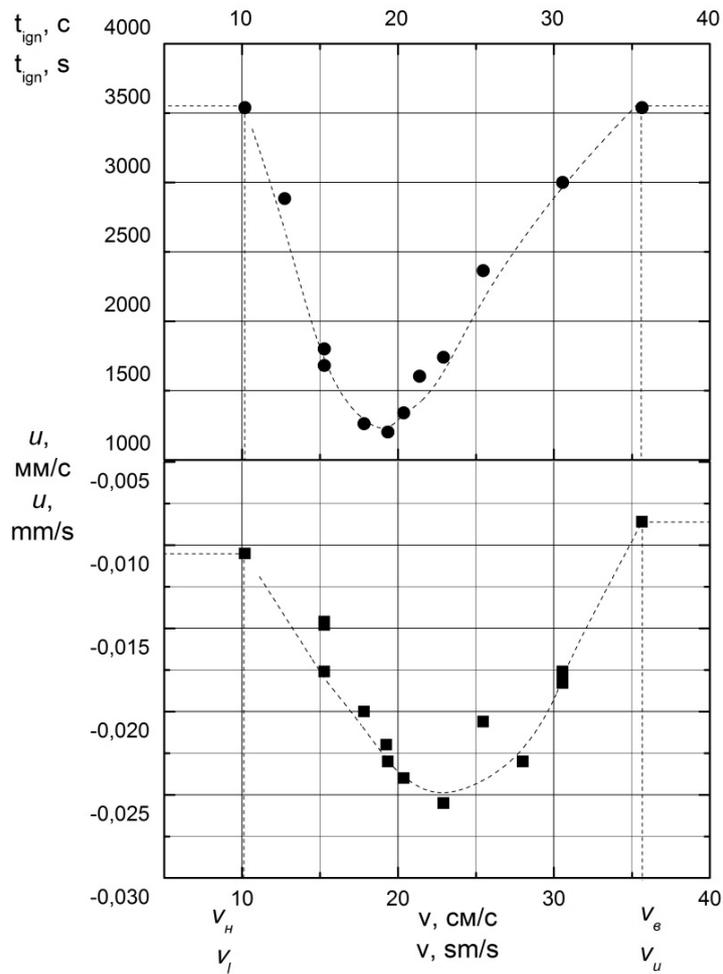


Рис. 5 – Зависимости времени зажигания t_{ign} и скорости волны ФГГ u от скорости подачи газовой смеси v :

- – время зажигания смеси (с); ■ – скорость волны ФГГ (мм/с). Средний диаметр зерна пористой среды $d_s = 4$ мм

Fig. 5 – Dependences of the ignition time t_{ign} and the FGG wave rate on the gas mixture supply rate:

- – mixture ignition time (s); ■ is the FGG wave velocity (mm/s). An average grain diameter of the porous medium $d_s = 4$ mm

В крайних точках (на рис. 5 при скоростях подачи газовой смеси меньших, чем $v_H = 10$ см/с и больших, чем $v_B = 37$ см/с) значения времени зажигания и скорости волны ФГГ не удалось установить точно, поскольку формирования волны горения не произошло и эксперимент, после длительного промежутка времени, был остановлен.

Значения времени зажигания при этих экспериментальных данных были интерпретированы как пределы зажигания волны горения по скорости подачи газовой смеси для данного состава смеси и размера зерен пористой среды.

График зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи исходной газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 4 мм представлен на рис. 6.

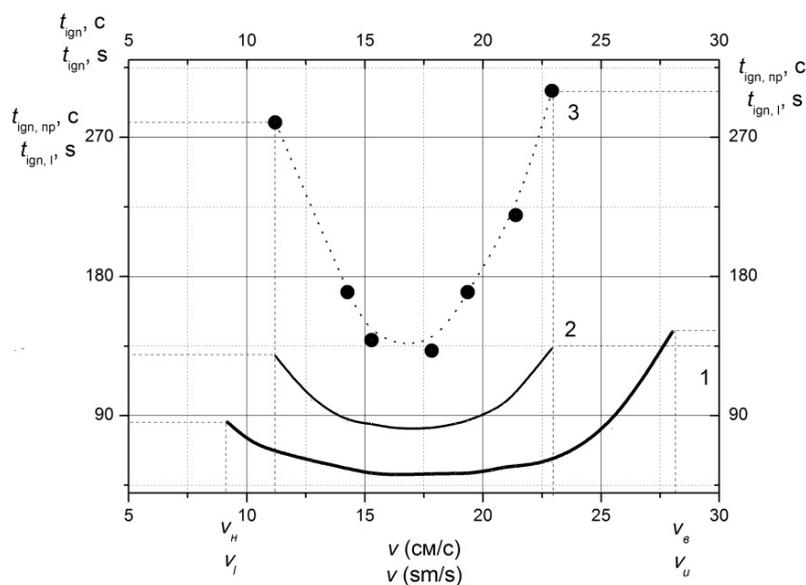


Рис. 6 – Зависимости времени зажигания волны ФГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 4$ мм. Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0$ Вт / (м² · К); 2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 250$ Вт / (м² · К); 3 – экспериментальные данные

Fig. 6 – Dependences of the ignition time of the FGG wave on the gas mixture supply rate for a porous medium with an average grain diameter $d_s = 4$ mm. Calculated and experimental data:

1 – external heat transfer coefficient $\alpha_w = 0$ W / (m² · K); 2 – external heat transfer coefficient $\alpha_w = 250$ W / (m² · K); 3 – experimental data

На рис. 7 показан аналогичный график зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 5 мм.

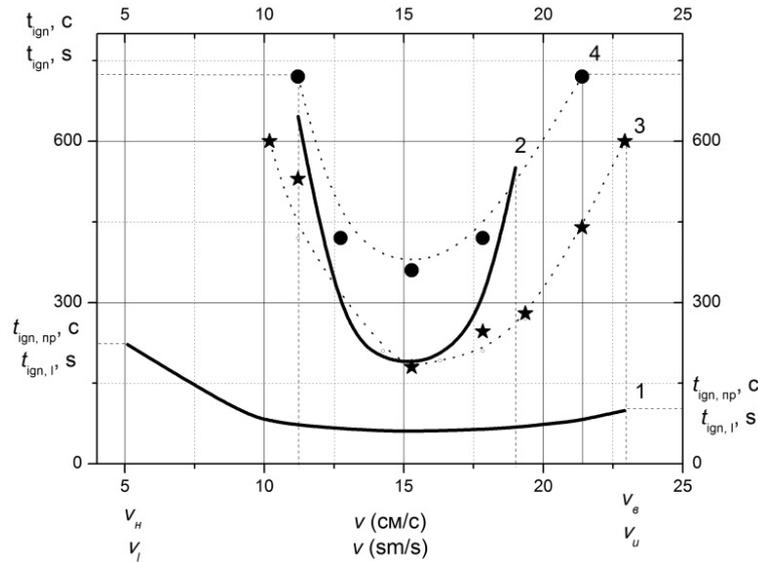


Рис. 7 – Зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 5$ мм. Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0$ Вт / (м² · К); 2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 380$ Вт / (м² · К); 3 – экспериментальные данные при использовании тепловой изоляции; 4 – экспериментальные данные без использования тепловой изоляции

Fig. 7 – Dependences of the ignition time of the FGG wave on the gas mixture supply rate for a porous medium with an average grain diameter $d_s = 5$ mm. Calculated and experimental data:

1 is the external heat transfer coefficient $\alpha_w = 0$ W/(m² · K); 2 is the external heat transfer coefficient $\alpha_w = 380$ W/(m² · K); 3 is the experimental data when using thermal insulation; 4 is the experimental data without the use of thermal insulation

4. Обсуждение результатов

Одним из полученных результатов исследования является обнаружение предельных значений скорости подачи горючего газа v_H и v_B , при которых формирования волны ФГГ не происходит (рис. 5–7).

Наличие этих пределов предположительно обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения за счет теплопроводности пористой среды. При v меньшей, чем v_H , скорость отвода тепла превышает скорость его поступления. Верхний предел по скорости подачи газа v_B обусловлен высоким конвективным выносом тепла за пределы пористой среды. При скоростях подачи газа больших, чем v_B , горячий прореагировавший газ прогревает только тонкий слой твердой фазы до температуры, недостаточной для входа пламени.

Полученные зависимости показывают влияние коэффициента внешней теплоотдачи на время зажигания волны ФГГ (рис. 6, 7). При наличии отвода тепла во внешнюю среду время зажигания волны ФГГ t_{ign} увеличивается, о чем свидетельствуют различные предельные значения $t_{ign, пр}$. Наличие этих пределов

также обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения во внешнюю среду.

Сравнение рис. 6 и 7 указывает на несущественное влияние среднего диаметра зерна пористой среды d_s на время зажигания волны ФГГ t_{ign} , что согласуется с данными, приведенными в работе [2] и полученными численным моделированием.

Отличие значений скорости подачи газа v , соответствующих минимальному времени зажигания волны ФГГ t_{ign} и максимальной скорости волны горения ФГГ u , показанное на рис. 5, обусловлено изменением характера теплообмена с пористой средой. На этапе формирования волны ФГГ идет нагрев тонкого слоя пористой среды (порядка характерного размера зерна) вблизи места входа волны горения. При увеличении скорости потока горючей смеси нагрев зерен уменьшается и скорость передачи тепла вперед, в пористую среду, падает. Время входа пламени в пористую среду при этом возрастает. При перемещении сформировавшейся волны ФГГ вглубь пористой среды при той же скорости потока время прогрева зерен определяется не временем теплообмена между горячими продуктами горения и зерном, а процессами теплопередачи через пористую среду вперед по ходу движения волны ФГГ. Теплоотвод из зоны горения происходит только вперед, что позволяет волне горения и далее повышать свою скорость с увеличением скорости потока.

Полученные зависимости (см. рис. 4–7) указывают на качественное соответствие теоретической модели процесса зажигания волны ФГГ экспериментально наблюдаемому процессу.

Заключение

Предложен метод определения момента формирования волны ФГГ, необходимый для обработки данных, получаемых в процессе исследования формирования волны ФГГ.

Проведено сравнение полученных экспериментально и полученных математическим моделированием пределов распространения волн ФГГ в зависимости от скорости подачи газовой смеси: установлено наличие верхнего и нижнего пределов формирования волны ФГГ по скорости подачи газовой смеси.

Зависимости времени входа пламени от расхода газовой смеси имеют U-образную форму, что качественно соответствует расчетным данным.

Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ.

Показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи при проведении численного моделирования процесса зажигания волны ФГГ.

Также показано влияние на время зажигания волны ФГГ среднего диаметра зерен пористой среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. – 1987. – № 5. – С. 27–44.
2. Зажигание волн фильтрационного горения газа пламенем фильтрующегося газа / Н.А. Какуткина, А.А. Коржавин, Е.В. Манжос, А.Д. Рычков // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 43–50.
3. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. – 203 с.
4. Палесский Ф.С., Фурсенко Р.В., Минаев С.С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–10.

5. Laevsky Yu., Nosova T. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2099. – P. 012010. – DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.
6. Пинаев А.В., Лямин Г.А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. – 1989. – Т. 25, № 4. – С. 75–85.
7. Футько С.И., Жданок С.А. Химия фильтрационного горения газов. – Минск: Белорусская наука, 2004. – 319 с.
8. Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner / R.V. Fursenko, E.S. Odintsov, S.S. Minaev, I.A. Yakovlev, S.D. Zambalov // *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 232. – P. 111711. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111711. – EDN YCOPGB.
9. Numerical investigation on the effect of porosity distribution on the flame characteristics / Z. Chen, Y. Han, H. Liu, J. Shi, S. Suo, L. Jiang, M. Xie // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 147. – P. 106953. – DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106953.
10. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д. Особенности прогорания пористых огнепреградителей засыпного и канального типа // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 35–43.
11. Nolan D.P. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. – 4th ed. – Gulf Professional Publishing, 2019. – 507 p. – ISBN 9780128160022. – DOI: 10.1016/B978-0-12-816002-2.00025-8.
12. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 44–51.
13. Математическая теория горения / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
14. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов (справочное руководство). – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
16. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Мбарова М. Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- и метано-воздушных смесей в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 8–20.
17. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

STUDY OF INITIATION OF GAS FILTRATION COMBUSTION WAVE BY AN OPEN FLAME

Manzhos E.V., Korzhavin A.A.

*Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

One of the processes of filtration combustion, namely the process of filtration combustion of gas, is considered. Its importance and practical significance are emphasized. The current state of research is shown and the need to study the non-stationary processes of filtration combustion of gas is revealed. The article examines one of the non-stationary processes of filtration combustion of gas, which is of great importance: the process of formation of a wave of filtration combustion of gas, which occurs when a burning gas mixture moves through an inert porous medium towards the flow of a combustible mixture. This process occurs when devices using filtration combustion of gas are operating: devices for afterburning poor gas mixtures, radiation burners, etc. A comprehensive study of this process has been carried out, including mathematical modeling and experimental research. The necessity of using a comprehensive study is shown. A method for processing experimental data is proposed. The factors influencing the process of formation of the filtration combustion wave of gas when it is initiated by an open flame are established. The influ-

ence of the gas mixture feed rate, heat loss from the porous medium to the external environment, and the grain size of the porous medium on the ignition process and the movement of the filtration combustion wave of gas was revealed.

Keywords: filtration combustion of gas, formation of the wave of filtration combustion of gas, complex research, mathematical modeling, experimental research.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66

REFERENCES

1. Babkin V.S., Laevskii Yu.M. Fil'tratsionnoe gorenie gazov [Filtration combustion of gases]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1987, no. 5, pp. 27–44. (In Russian).
2. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Manzhos E.V., Rychkov A.D. Zazhiganie voln fil'tratsionnogo goreniya gaza plamenem fil'truyushchegosya gaza [Ignition of filtration gas combustion waves by the flame of the filtered gas]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 43–50. (In Russian).
3. Dobrego K.V., Zhdanok S.A. *Fizika fil'tratsionnogo goreniya gazov* [Physics of filtration combustion of gases]. Minsk, A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the NAS of Belarus Publ., 2002. 203 p. (In Russian).
4. Paleskii F.S., Fursenko R.V., Minaev S.S. Modelirovanie fil'tratsionnogo goreniya gazov v tsilindricheskoj poristoi gorelke s uchetom radiatsionnogo teploobmena [Modeling of filtration combustion of gases in a cylindrical porous burner with allowance for radiative heat transfer]. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion and Shock Waves]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 3–10. (In Russian).
5. Laevsky Yu., Nosova T. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2099, p. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.
6. Pinaev A.V., Lyamin G.A. Osnovnye zakonomernosti dozvukovogo i detonatsionnogo goreniya gazov v inertnykh poristyykh sredakh [The main regularities of subsonic and detonation combustion of gases in inert porous media]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1989, vol. 25, no. 4, pp. 75–85. (In Russian).
7. Fut'ko S.I., Zhdanok S.A. *Khimiya fil'tratsionnogo goreniya gazov* [Chemistry of filtration combustion of gases]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2004. 319 p.
8. Fursenko R.V., Odintsov E.S., Minaev S.S., Yakovlev I.A., Zambalov S.D. Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner. *Combustion and Flame*, 2021, vol. 232, p. 111711. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111711.
9. Chen Z., Han Y., Liu H., Shi J., Suo S., Jiang L., Xie M. Numerical investigation on the effect of porosity distribution on the flame characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 147, p. 106953. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106953.
10. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Rychkov A.D. Osobennosti progoraniya poristyykh ognepregraditelei zasypnogo i kanal'nogo tipa [Features of burning out of porous backfill and channel type fire barriers]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 35–43. (In Russian).
11. Nolan D.P. *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. 4th ed. Gulf Professional Publishing, 2019. 507 p. ISBN 9780128160022. DOI: 10.1016/B978-0-12-816002-2.00025-8.
12. Kakutkina N.A., Rychkov A.D. Modelirovanie nestatsionarnyykh protsessov fil'tratsionnogo goreniya gaza [Modeling of non-stationary processes of filtration combustion of gas]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 44–51. (In Russian).
13. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya* [Mathematical theory of combustion]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 478 p.

14. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov (spravochnoe rukovodstvo)* [Thermophysical properties of materials. Handbook]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 356 p.
15. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972. 720 p.
16. Kakutkina N.A., Korzhavin A.A., Mbarava M. Osobennosti fil'tratsionnogo goreniya vodorodo-, propano- i metano-vozdushnykh smesei v inertnykh poristykh sredakh [Features of filtration combustion of hydrogen-, propane- and methane-air mixtures in inert porous media]. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2006, vol. 42, no. 4. pp. 8–20. (In Russian).
17. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskii D.A. *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem: gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty* [Devices with a stationary granular layer. hydraulic and thermal fundamentals of operation]. Leningrad, Khimiya Publ., 1979. 176 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Манжос Евгений Витальевич – родился в 1979 году, мл. науч. сотр., лаборатория физики и химии горения газов, Институт химической кинетики и горения СО РАН. Область научных интересов: фильтрационное горение, взрывы пылегазовых смесей. Опубликовано 2 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, д. 3. E-mail: fhgg1@kinetics.nsc.ru).

Manzhos Evgeny Vitalievich (b. 1979) – junior researcher, Lab of Physics and Chemistry of Gas Combustion, Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS. His research interests are currently focused on: filtration combustion, explosions of dust and gas mixtures. He is the author of 2 scientific papers. (Address: 3, Institutskaya St, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: fhgg1@kinetics.nsc.ru).



Коржавин Алексей Анатольевич – родился в 1949 году, д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, лаборатория физики и химии горения газов, Институт химической кинетики и горения СО РАН. Область научных интересов: кинетика, кинетика реакций, теплоемкость, экспериментальная физика, анализ горения, физическая химия, химическая инженерия. Опубликовано 65 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 3. E-mail: korzh@kinetics.nsc.ru).

Korzhavin Alexey Anatolievich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), Associate Professor, Head of Lab, Lab of Physics and Chemistry of Gas Combustion, Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS His research interests are currently focused on: kinetics, reaction kinetics, heat capacity, experimental physics, combustion analysis, physical chemistry, and chemical engineering. He is the author of 65 scientific papers. Address: 3, Institutskaya St, Novosibirsk, 630090, Russia (E-mail: korzh@kinetics.nsc.ru).

*Статья поступила 19 апреля 2024 г.
Received April 19, 2024*

To Reference:

Manzhos E.V., Korzhavin A.A. Issledovanie initsirovaniya volny fil'tratsionnogo goreniya gaza otkrytym plamenem [Study of initiation of gas filtration combustion wave by an open flame]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 54–66. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-54-66.

УДК 62-643;536.463

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЫЛИТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В АТМОСФЕРНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ**М.А. Мухина¹, И.С. Садкин^{1,2}, Е.Ю. Шадрин¹, Е.П. Копьев¹**¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*²*Новосибирский государственный технический университет*

В настоящей работе на примере дизельного топлива исследованы характеристики сжигания жидких углеводородов при распылении высокоскоростной воздушной струей. Такой подход распыла жидкого топлива в процессах горения имеет ряд преимуществ перед традиционным распылом: возможность подачи топлива с низкой степенью очистки, снижение вероятности коксования топливной аппаратуры. С помощью атмосферного горелочного устройства с естественной подачей воздуха в камеру смешения исследованы зависимости состава промежуточных и конечных продуктов сгорания, проведено измерение температуры пламени при различных расходах топлива и параметрах распыляющей воздушной струи (расход, температура). Выполнено сопоставление полученных характеристик для эквивалентных режимов при различной температуре подаваемого распылителя. Получено, что при использовании в качестве распылителя нагретого воздуха обеспечиваются более высокие температуры пламени, за счет чего обеспечивается более полное выгорание топлива и снижение концентрации CO в уходящих газах, но при этом, наблюдается небольшой рост NO_x.

Ключевые слова: горелочное устройство, горение жидких углеводородов, распыление топлива, снижение вредных выбросов, разбавление.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-67-77

Введение

В связи с ужесточением норм содержания вредных веществ в выхлопных газах актуальны исследования в области технологий снижения выбросов. Среди различных методов контроля выбросов в современных системах сгорания широко используется разбавление для снижения пиковой температуры сгорания и, следовательно, концентрации NO_x в выхлопных газах. Применяются такие методы как рециркуляция дымовых газов [1], системы ступенчатого сжигания [2], разбавление углекислым газом [3], MILD сжигание [4] и другие. Тем самым обусловлен интерес к исследованию влияния различных разбавителей и коэффициентов разбавления на экологические и термические характеристики горения [5].

Помимо типа разбавителя и коэффициента разбавления на содержание вредных веществ в продуктах сгорания может влиять и температура подаваемой среды. В статье [6] изучается влияние предварительного подогрева воздухозаборника на работу двухтопливного дизельного двигателя. Показано, что этот способ в сочетании с методом EGR [7, 8] позволяет повысить эффективность двигателя (до 5 %) и снизить выбросы CO (до 10 %). Так, в [9] высказано предположение, что увеличение начальной температуры предварительной смеси синтез-газ/воздух приводит к увеличению ламинарной скорости горения и адиабатической температуры пламени. В [10] авторы рассмотрели влияние температуры всасываемого воздуха (40 и 60 °C) на характеристики работы дизельного двигателя. Показано, что предварительный подогрев всасываемого воздуха может снизить выбросы CO

и твердых углеродных частиц, но увеличивает содержание NO_x в выхлопных газах.

В ИТ СО РАН исследован метод сжигания жидкого углеводородного топлива, диспергированного высокоскоростной струей перегретого пара [11], как подход низкоэмиссионного горения с разбавителем. Отличительной особенностью этого метода от традиционных подходов является то, что он основан на взаимодействии высокоскоростной газовой струи с каплей топлива, что обеспечивает качественное диспергирование различных видов топлива [12] и может быть использован даже для сжигания жидких горючих отходов. В работах также показано, что использование перегретого пара позволяет существенно снизить содержание вредных выбросов в продуктах сгорания по сравнению с нагретым воздухом. Так, использование перегретого водяного пара позволяет реализовать частичную паровую газификацию при взаимодействии с топливной каплей. Кроме того, обеспечивается снижение концентрации оксидов азота в выхлопных газах до 50 % при высокой эффективности сгорания углеводородного топлива [13, 14]. В работах такой эффект связывают со снижением температуры пламени, за счет чего снижается образование «термических» NO_x . Однако в предыдущих работах не было проведено сравнение с характеристиками сжигания при распыле топлива средами с низкой температурой, а кинетика горения жидких углеводородов при распылении воздухом и водяным паром при различных температурах до сих пор остается малоизученной.

Целью настоящей работы является исследование влияния параметров распылителя (тип, температура, расход и т.д.) на процесс сжигания жидкого углеводородного топлива в распылительном горелочном устройстве. Для этого получены данные и проведено сопоставление результатов при работе устройства на холодном и нагретом воздухе для эквивалентных режимов, а также тепловых характеристик при распыле перегретым паром.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Для экспериментальных исследований был использован лабораторный образец атмосферной горелки мощностью до 20 кВт (рис. 1). Основными элементами горелочного устройства являются: основание, корпус, выходное сопло, распылительная форсунка, трубка подачи топлива. В нижней части корпуса горелочного устройства имеются отверстия для естественного притока атмосферного воздуха из окружающей среды. В горелке топливо распыляется непосредственно высокоскоростной струей воздуха, подаваемой из форсунки. Образующийся мелкодисперсный газок капельный поток поджигается внешней горелкой. Подробное описание устройства приведено в [15].

Горелочное устройство монтировалось на открытый экспериментальный стенд, в котором имеются автоматизированные системы подачи и регулировки топлива и сжатого воздуха. Схема экспериментального стенда, используемого в работе, представлена на рис. 2.

Измерения температуры пламени проводились с помощью платиновой-платинородиевой термопары типа В, которая перемещалась внутри пламени при помощи автоматизированного координатно-перемещающего устройства. Для проведения газового анализа промежуточных продуктов реакции в пламени горелки использовался газоанализатор Тест-1 (O_2 , CO_2 , CO , H_2 , C_nH_m и др.). Газовый состав конечных продуктов сгорания дизеля определялся с помощью газоанализатора Testo 350 (O_2 , CO , NO_x и др.). Для определения теплоты сгорания топлива использовался проточный калориметр, который представляет собой конструкцию «труба в трубке», внутренний канал – для потока газа, внешний – для

теплоносителя (воды), идущего в противоположном направлении, он служит для отвода тепла от продуктов сгорания. Более подробно экспериментальная установка описана в [14].

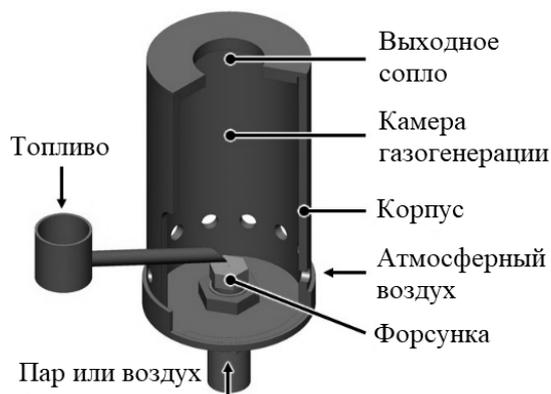


Рис. 1 – Схема атмосферного горелочного устройства

Fig. 1 – Scheme of an atmospheric burner device

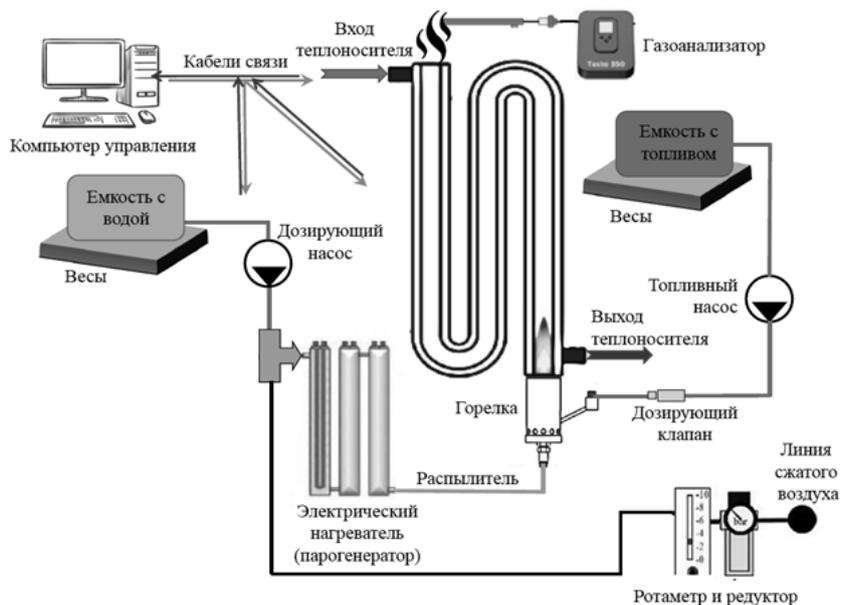


Рис. 2 – Схема экспериментального стенда

Fig. 2 – Scheme of the experimental stand

Для исследований использовалось дизельное топливо. Распыление топлива осуществлялось холодным сжатым воздухом (при комнатной температуре ~ 21 °С) и нагретым до 250 °С. Исследования проведены для режимов, представленных в табл. 1. Выбор режимов обусловлен тем, что в работе [15] при сжигании дизельного топлива распыленного нагретым воздухом для указанных параметров наблюдалась высокая полнота сгорания топлива и низкое содержание CO в про-

дуктах сгорания (табл. 1, режимы 4–6). Режимы 1–3 выбраны из эквивалентности режимам 4–6 по параметру динамического воздействия распыляющей струи, рассчитанному по [16].

Таблица 1 / Table 1

Описание исследуемых режимов
Description of the modes under study

Обозначение / Designation	1	2	3	4	5	6
Температура распылителя (воздуха), °С / Temperature of atomizer (air), °С	21			250		
Давление, бар / Pressure, bar	6	7,5	8,9	5,7	7,5	8,6
Расход распылителя, кг/ч / Atomizer consumption, kg/h	1,05	1,33	1,57	0,81	1,07	1,24
Динамическое воздействие, Н / Dynamic impact, N	0,146	0,193	0,234	0,149	0,207	0,245
Расход топлива, кг/ч / Fuel consumption, kg/h	1,2					

2. Результаты измерений и их анализ

На рис. 3 представлены фотографии пламени для режимов, где дизельное топливо распыляется струей воздуха комнатной температуры (1–3 режимы) и струей нагретого воздуха $T = 250$ °С (4–6 режимы). При распылении топлива струей воздуха комнатной температуры в пламени наблюдается больше желто-оранжевых зон, нежели при сжигании дизеля в струе нагретого воздуха. Эквивалентные режимы 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 имеют схожий размер внешнего пламени, что косвенно указывает на правильный подбор режимов по параметру динамического воздействия распыляющей струи. Видно, что при увеличении расхода распылителя видимая длина факела уменьшается как при холодном, так и нагретом распылителе, а его цвет становится преимущественно синим за счет большей степени разбавления воздухом, эжектируемого из окружающей среды распыляющей струей.

На рис. 4 показаны профили температуры пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства. Профили температуры для исследуемых режимов имеют схожий вид. Максимум температуры достигается на некотором расстоянии от сопла, что говорит о догорании топлива при выходе из горелочного устройства. При увеличении расхода распылителя максимум температуры снижается и сдвигается вверх по потоку, что вероятнее всего связано с большим разбавлением смеси воздухом, эжектируемым из окружающей среды. При этом для режимов при нагреве воздуха для режимов 4–6 температура пламени выше ($\sim 100^\circ$), чем для режимов 1–3, что, вероятно, связано различием в начальных параметрах температуры распылителя.

На рис. 5 показаны профили концентраций различных газовых компонентов вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства. Профили компонентов имеют схожий вид, но разный уровень содержания веществ. Данные результаты могут быть связаны с тем, что для сравнения были подобраны параметры струи с равным динамическим воздействием. Таким образом, при разных температурах необходимо задавать различный расход для эквивалентных режимов. Несмотря на это, качественно можно отметить, что максимальные значения по CO_2 и CO , и минимальные по O_2 при нагретом воздухе находятся ближе к основанию внешнего пламени, что указывает на несколько раннее воспламенение топлива, с чем, вероятно, также связаны более высокие значения средней температуры в факеле для режимов 4–6 (рис. 4).

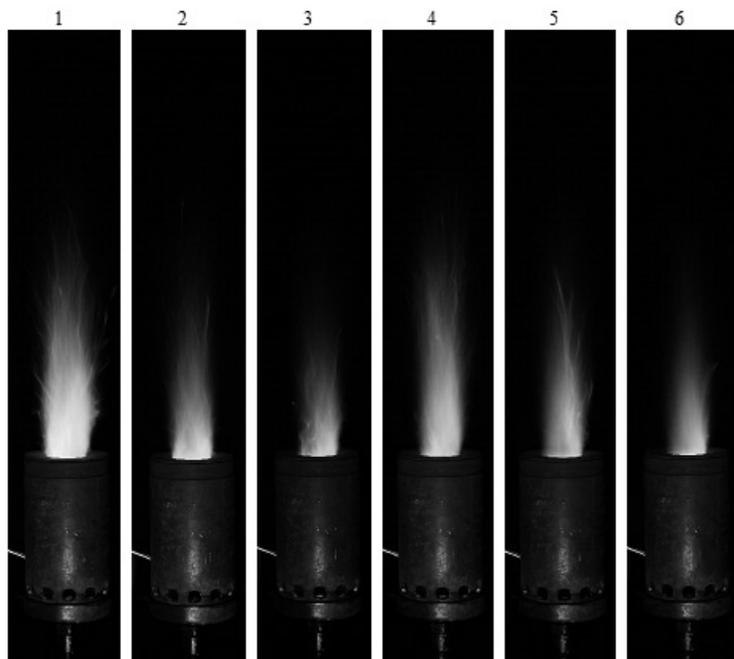


Рис. 3 – Фотографии пламени горелочного устройства (наименования режимов соответствуют табл. 1)

Fig. 3 – Photos of the flame of the burner device (names of modes correspond to Table 1)

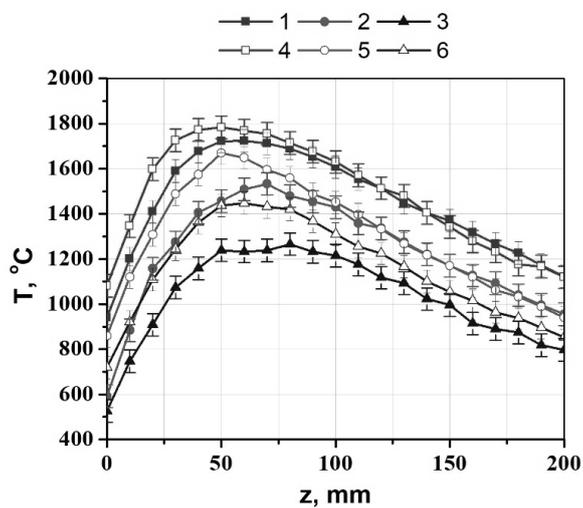


Рис. 4 – Распределение средней температуры вдоль вертикальной оси сопла горелки (наименования режимов соответствуют табл. 1)

Fig. 4 – Average temperature distribution along the vertical axis of the burner nozzle (names of modes correspond to Table 1)

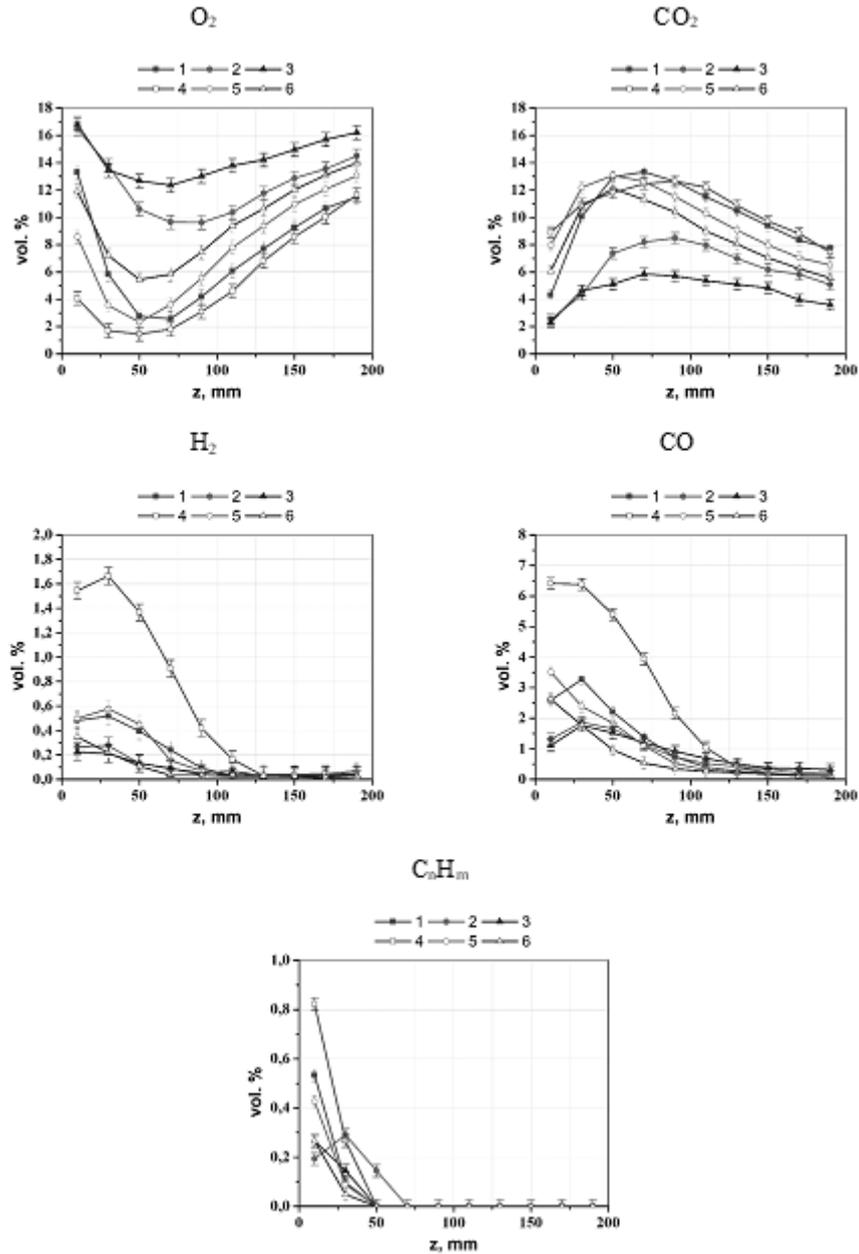


Рис. 5 – Профили концентраций различных газовых компонент вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства (наименования режимов соответствуют табл. 1)

Fig. 5 – Concentration profiles of various gas components along the vertical axis of the burner nozzle (names of modes correspond to Table 1)

В табл. 2 представлены результаты измерения содержания CO и NO_x в конечных продуктах сгорания, а также расчетная удельная теплота сгорания дизельного топлива в горелочном устройстве при его распыле воздухом разной степени нагрева для режимов 3 и 6, а также эквивалентного им режима при распыле топлива перегретым водяным паром [15].

Таблица 2 / Table 2

Тепловые показатели горелочного устройства

Thermal indicators of the burner device

	Удельная теплота, МДж/кг / Specific heat, MJ/kg	CO, мг/кВт / CO, mg/kWh	NO _x , мг/кВт / NO _x , mg/kWh	Класс по EN 267 / Class EN 267
3 – Холодный воздух / 3 – Cold Air	43,6	40	126	2
6 – Нагретый воздух / 6 – Hot Air	44,0	29	133	2
Пар / Steam [16]	44,3	36	77	3

По полученным результатам видно, что нагрев распылителя, в случае сжатого воздуха, позволяет несколько снизить содержание монооксида углерода в продуктах сгорания, но при этом наблюдается некоторый рост содержания оксидов азота. Однако использование холодного воздуха не позволяет обеспечить значительное снижение, как в случае с перегретым паром, и полученные значения позволяют отнести устройство при распыле воздухом как комнатной температуры, так и нагретым только ко второму классу по нормативу [17].

Стоит отметить, что в [12, 15] наблюдался схожий уровень понижения максимального значения температуры в пламени, аналогично рис. 4 – более чем 100°, при распылении топлива перегретым водяным паром. В работах делался вывод, что в случае использования пара максимальная температура пламени снижается из-за разбавления топливной смеси балластным газом, за счет чего обеспечивается значительное снижение содержания оксидов азота в уходящих газах. Однако, как видно из табл. 2, в случае подачи воздуха комнатной температуры, по сравнению с нагретым воздухом, такого снижения не отмечается при схожих остальных параметрах. Можно заключить, что положительное влияние перегретого водяного пара на сжигание жидких углеводородов связано не только с разбавлением топливной смеси балластным газом, но и дополнительным влиянием на протекание химических реакций, в том числе как третье тело.

Заключение

В работе на примере дизельного топлива проведено изучение экологических и тепловых показателей сжигания жидких углеводородов, распыляемых нагретым и холодным сжатым воздухом. Изучались следующие основные характеристики процесса сжигания: температура факела, состав промежуточных и конечных продуктов сгорания, тепловыделение при различных режимах работы устройства. При анализе промежуточных компонентов процесса горения топлива вдоль оси симметрии пламени было отмечено, что нагрев распылителя приводит к более раннему воспламенению топливной смеси и, как следствие, – к более высокой температуре факела.

Анализ уходящих газов показал, что при распылении холодным воздухом достигается снижение уровня выброса монооксида углерода, но при этом наблюдается небольшой рост выбросов оксидов азота. При сопоставлении полученных значений монооксида углерода и оксидов азота для режимов с воздухом и паром в качестве распылителя было показано, что использование пара приводит к лучшим экологическим показателям. Сделан вывод, что положительное влияние

перегретого водяного пара на сжигание жидких углеводородов связано не только с разбавлением топливной смеси балластным газом, но и дополнительным влиянием на протекание химических реакций, в том числе как третье тело.

ЛИТЕРАТУРА

1. Exhaust Gas Recirculation (EGR) analysis of a swirl-stabilized pulverized coal flame with focus on NO_x release using FPV-LES / D. Meller, L. Engelmann, O.T. Stein, A.M. Kempf // *Fuel*. – 2023. – Vol. 343. – P. 127939.
2. Experimental investigation of the characteristics of NO_x emissions with multiple deep air-staged combustion of lean coal / Y. Wang, Y. Zhou, N. Bai, J. Han // *Fuel*. – 2020. – Vol. 280. – P. 118416.
3. **Soloklou M.N., Golneshan A.A.** Effect of CO₂ diluent on the formation of pollutant NO_x in the laminar non-premixed methane-air flame // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 148. – P. 119071.
4. **Mohammadpour A., Mazaheri K., Alipoor A.** Reaction zone characteristics, thermal performance and NO_x/N₂O emissions analyses of ammonia MILD combustion // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2022. – Vol. 47 (48). – P. 21013–21031.
5. The effects of steam dilution on flame structure and stability for a H₂/air micromix burner / Ch. Lu, L. Zhang, X. Chen, C. Xing, L. Liu, H. Shi, P. Qiu // *Journal of the Energy Institute*. – 2023. – Vol. 107. – Art. 101188.
6. **Papagiannakis R.G.** Study of air inlet preheating and EGR impacts for improving the operation of compression ignition engine running under dual fuel mode // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – Vol. 68. – P. 40–53.
7. Effect of EGR on performances and emissions of DI diesel engine fueled with waste plastic oil: CDF approach / K. Naima, Y. Menni, M. Alliche, G. Lorenzini, H. Ahmad, A. Liazid // *Annales de Chimie – Science des Matériaux*. – 2021. – Vol. 45 (3). – P. 217–223.
8. **Kannappan C., Sengottaiyan S., Ramasamy R.** The combined effect of EGR and hydrogen addition on a *Syzygium cumini* (jamun) liquid biofuel engine // *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. – 2023. – Vol. 16 (1). – Art. 105.
9. Experimental and numerical study of the effect of initial temperature on the combustion characteristics of premixed syngas/air flame / Z. Xu, H. Deng, S. Wei, M. Yan, X. Wen, F. Wang, G. Chen // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48 (12). – P. 4875–4890.
10. **Kumar K.S., Raj R.T.K.** Effect of fuel injection timing and elevated intake air temperature on the combustion and emission characteristics of dual fuel operated diesel engine // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 64. – P. 1191–1198.
11. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 163. – P. 114400.
12. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization / I. Anufriev, E. Kovyev, S. Alekseenko, O. Sharypov, E. Butakov, M. Vigriyanov, I. Sadkin // *Thermal Science*. – 2021. – Vol. 25 (1-A). – P. 331–345.
13. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov, M.S. Vigriyanov // *Energy*. – 2022. – Vol. 250. – P. 123849.
14. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina // *Process Safety and Environmental Protection, Part B*. – 2021. – Vol. 152. – P. 240–248.
15. **Anufriev I.S., Kopyev E.P.** Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 192. – P. 154–169.
16. Experimental study of liquid hydrocarbon combustion under conditions of steam gasification in the presence of diluent gas / E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina, E.Yu. Shadrin, D.V. Krasinsky, S.Yu. Shimchenko // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2233. – P. 012015.
17. DIN EN 267:2011-11. Automatic forced draught burners for liquid fuels.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF SPRAYER TEMPERATURE ON THE CHARACTERISTICS OF DIESEL FUEL COMBUSTION IN AN ATMOSPHERIC BURNER DEVICE

Mukhina M.A.¹, Sadkin I.S.^{1,2}, Shadrin E.Yu.¹, Kopyev E.P.¹

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In this work, using diesel fuel as an example, we studied the combustion characteristics of liquid hydrocarbons when atomized by a high-speed air jet. This approach to spraying liquid fuel in combustion processes has a number of advantages over traditional spraying: the ability to supply fuel with a low degree of purification and to reduce the likelihood of fuel equipment coking. Using an atmospheric burner device with natural air supply into the mixing chamber, the dependences of the composition of intermediate and final combustion products were studied, and the flame temperature was measured at various fuel flow rates and parameters of the atomizing air jet (flow rate, temperature). A comparison was made of the obtained characteristics for equivalent modes at different temperatures of the supplied atomizer. It was found that when heated air is used as a sprayer, higher flame temperatures are ensured, which ensures a more complete fuel burnout and a decrease in CO concentration in the flue gases, but at the same time, a slight increase in NO_x is observed.

Keywords: burner device, combustion of liquid hydrocarbons, fuel atomization, reduction of harmful emissions, dilution.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-67-77

REFERENCES

1. Meller D., Engelmann L., Stein O.T., Kempf A.M. Exhaust Gas Recirculation (EGR) analysis of a swirl-stabilized pulverized coal flame with focus on NO_x release using FPV-LES. *Fuel*, 2023, vol. 343, p. 127939.
2. Wang Y., Zhou Y., Bai N., Han J. Experimental investigation of the characteristics of NO_x emissions with multiple deep air-staged combustion of lean coal. *Fuel*, 2020, vol. 280, p. 118416.
3. Soloklou M.N., Golneshan A.A. Effect of CO₂ diluent on the formation of pollutant NO_x in the laminar non-premixed methane-air flame. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 148, p. 119071.
4. Mohammadpour A., Mazaheri K., Alipoor A. Reaction zone characteristics, thermal performance and NO_x/N₂O emissions analyses of ammonia MILD combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47 (48), pp. 21013–21031.
5. Lu Ch., Zhang L., Chen X., Xing C., Liu L., Shi H., Qiu P. The effects of steam dilution on flame structure and stability for a H₂/air micromix burner. *Journal of the Energy Institute*, 2023, vol. 107, art. 101188.
6. Papagiannakis R.G. Study of air inlet preheating and EGR impacts for improving the operation of compression ignition engine running under dual fuel mode. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 68, pp. 40–53.
7. Naima K., Menni Y., Alliche M., Lorenzini G., Ahmad H., Liazid A. Effect of EGR on performances and emissions of DI diesel engine fueled with waste plastic oil: CDF approach. *Annales de Chimie – Science des Matériaux*, 2021, vol. 45 (3), pp. 217–223.
8. Kannappan C., Sengottaiyan S., Ramasamy R. The combined effect of EGR and hydrogen addition on a Syzygium cumini (jamun) liquid biofuel engine. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2023, vol. 16 (1), art. 105.
9. Xu Z., Deng H., Wei S., Yan M., Wen X., Wang F., Chen G. Experimental and numerical study of the effect of initial temperature on the combustion characteristics of premixed syngas/air flame. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, vol. 48 (12), pp. 4875–4890.

10. Kumar K.S., Raj R.T.K. Effect of fuel injection timing and elevated intake air temperature on the combustion and emission characteristics of dual fuel operated diesel engine. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 64, pp. 1191–1198.
11. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 163, p. 114400.
12. Anufriev I., Kovyev E., Alekseenko S., Sharypov O., Butakov E., Vigriyanov M., Sadkin I. Cleaner crude oil combustion during superheated steam atomization. *Thermal Science*, 2021, vol. 25 (1-A), pp. 331–345.
13. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam. *Energy*, 2022, vol. 250, p. 123849.
14. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning. *Process Safety and Environmental Protection, Part B*, 2021, vol. 152, pp. 240–248.
15. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 192, pp. 154–169.
16. Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A., Shadrin E.Yu., Krasinsky D.V., Shimchenko S.Yu. Experimental study of liquid hydrocarbon combustion under conditions of steam gasification in the presence of diluent gas. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2233, p. 012015.
17. DIN EN 267:2011-11. *Automatic forced draught burners for liquid fuels*.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Мухина Мария Андреевна – родилась в 1998 г., аспирант ИТ СО РАН, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 33 научные работы (РИНЦ). (630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: mary-andr@yandex.ru).

Mukhina Mariia Andreevna (b. 1998), a PhD student in IT SB RAS, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. Her research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. She is the author of about 33 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: mary-andr@yandex.ru).



Садкин Иван Сергеевич – родился в 1998 г., аспирант НГТУ, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 58 научных работ (РИНЦ). (630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru/

Sadkin Ivan Sergeevich (b. 1998) a PhD student in NSTU, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is the author of about 58 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).



Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 г., канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр. лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. Email: evgen_zavita@mail.ru)

Shadrin Evgeny Yurievich (b. 1992) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Junior Researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is the author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru)



Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 г., канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru)

Kopyev Evgeny Pavlovich (b. 1991) – Candidate of Sciences (Eng.), Head of Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is the author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Ac. Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru)

*Статья поступила 3 апреля 2024 г.
Received April 03, 2024*

To Reference:

Mukhina M.A., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya temperatury raspylitelya na kharakteristiki szhiganiya dizel'nogo topliva v atmosfernom gorelochnom ustroistve [Experimental study of the effect of sprayer temperature on the characteristics of diesel fuel combustion in an atmospheric burner device]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 2 (63), pp. 67–77. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-2-67-77.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Выпуск 2 (63) апрель–июнь 2024

Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 21.06.2024. Выход в свет 26.06.2024. Бумага офсетная. Формат 70×108 1/16
Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 7,0. Печ. л. 5,0. Изд. № 90. Заказ № 142. Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

16+

Индекс журнала в Роспечати
82961