

ISSN 1727-2769

# ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

№ 2 (71)  
АПРЕЛЬ – ИЮНЬ  
2026



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

2026

апрель – июнь

№ 2 (71)

*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

**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, 2026

SCIENTIFIC JOURNAL

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

---

2026

April – June

№ 2 (71)

---

*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

**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, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

---

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Андрянов А.И.**

Исследование динамики преобразователей  
на основе двухполярной реверсивной модуляции .....5

**Бутаков Е.Б., Копьев Е.П., Садкин И.С., Шадрин Е.Ю.**

Совместный распыл несмешивающихся жидкостей  
струей перегретого водяного пара  
и его влияние на характеристики сжигания .....26

**Нейман В.Ю., Нейман Л.А.**

Математическая модель электромагнитного  
привода сейсмоисточника .....38

**Чичиндаев А.В., Выборов М.Р., Хромова И.В.**

Исследование работы теплообменника-регенератора  
авиационной системы кондиционирования воздуха .....54

**Темляков А.А.**

Импортозамещение двигателя экструдера  
автоматизированной линии асептического  
розлива жидкостей .....65

---

---

CONTENTS

---

TECHNICAL SCIENCES

***Andriyanov A.I.***

Study of converter dynamics based on bipolar  
reversible modulation .....5

***Butakov E.B., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu.***

Co-atomization of immiscible liquids by a jet of superheated  
steam and its effect on combustion characteristics .....26

***Neyman V.Yu., Neyman L.A.***

Mathematical model of an electromagnetic drive  
of the seismic source .....38

***Chichindaev A.V., Vyborov M.R., Khromova I.V.***

Study of the operation of a heat exchanger-regenerator of aircraft  
air conditioning system .....54

***Temlyakov A.A.***

Import substitution of an extruder motor for an  
automated aseptic liquid filling line .....65

---

УДК 621.314

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДВУХПОЛЯРНОЙ РЕВЕРСИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ

**А.И. Андриянов***Брянский государственный технический университет*

Объектом исследования в статье являются преобразователи напряжения на основе двухполярной реверсивной модуляции с постоянным или переменным выходным напряжением. Предметом исследования выступает устойчивость преобразователей напряжения на основе двухполярной реверсивной модуляции. Для оценки устойчивости преобразователей используется два основных подхода: анализ устойчивости на основе усредненных малосигнальных динамических моделей и анализ устойчивости на основе нелинейных динамических моделей с применением метода точечных отображений. В последнем случае была оценена устойчивость преобразователя напряжения при постоянном и переменном задающих сигналах с целью сравнительного анализа результатов. В статье представлены усредненная малосигнальная и нелинейная динамическая модели преобразователя на основе двухполярной реверсивной модуляции с пропорционально-интегральным регулятором, которая позволяет рассчитывать электромагнитные процессы в преобразователе как при переменном, так и при постоянном задающем сигнале. Данные модели позволяют в полной мере решать поставленные в работе задачи. Для анализа динамики построены карты динамических режимов для преобразователя с постоянным задающим сигналом и для преобразователя с синусоидальным задающим сигналом при двух разных параметрах задающих воздействий. На эти карты была наложена граница устойчивости, полученная на основе усредненной малосигнальной динамической модели. Анализ показал, что усредненная малосигнальная модель не позволяет спрогнозировать появление нежелательных динамических режимов в определенных областях параметров регулятора. Также было показано, что области желаемых режимов в пространстве параметров регулятора в преобразователе с синусоидальным задающим сигналом намного больше, чем в преобразователе с постоянным задающим сигналом при тех же параметрах силовой части.

*Ключевые слова:* однофазный инвертор напряжения, реверсивный преобразователь напряжения, двухполярная реверсивная модуляция, пропорционально-интегральный регулятор, устойчивость, нелинейная динамическая модель, желаемый динамический режим.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-5-25

### Введение

Однофазные инверторы напряжения (ОИН) достаточно широко распространены и обеспечивают синусоидальное напряжение на выходе, что требуется для питания различных нагрузок переменного тока [1–6]. Они строятся по схемам реверсивных преобразователей постоянного напряжения для двух разновидностей широтно-импульсной модуляции (ШИМ):

двухполярной реверсивной модуляции (ДРМ) или однополярной реверсивной модуляции [7]. При этом в отличие от реверсивных преобразователей постоянного напряжения в системе управления ОИН используется синусоидальный задающий сигнал.

Реверсивные преобразователи постоянного напряжения (РППН) [6, 7] применяются для питания нагрузок постоянного тока, где необходимо изменение знака выходного напряжения, например для изменения направления вращения двигателей и т. п.

Для управления ОИН и РППН применяются различные подходы [1–12], основной целью которых является стабилизация напряжения на нагрузке. В ряде случаев к ОИН предъявляются строгие требования к поддержанию синусоидальной формы выходного напряжения. Наиболее простой системой управления является система, обеспечивающая регулирование выходного напряжения по отклонению, где используется отрицательная обратная связь по мгновенному значению выходного синусоидального напряжения, а заданные динамические свойства системы определяются выбранным регулятором напряжения.

Выбор параметров регулятора напряжения связан с необходимостью обеспечения устойчивости замкнутой системы автоматического управления. При построении ОИН выбор параметров регулятора, как правило, осуществляется на основе усредненных малосигнальных моделей силовой части инвертора в предположении, что динамика инвертора не зависит от задающего сигнала [3–5], т. е. система является линейной. Действительно, такой подход в первом приближении правомерен, поскольку схемы реверсивных преобразователей [7], применяемые при построении ОИН, чаще всего обеспечивают линейную статическую характеристику.

Многочисленные работы, посвященные анализу динамики импульсных систем преобразования электроэнергии [12–17], показали, что усреднение и линеаризация ведут к потере информации о динамике системы и результаты, полученные с использованием малосигнального моделирования, не всегда подтверждаются как практикой, так и моделированием в существующих программных пакетах, где заведомо реализуются нелинейные динамические модели. Вопросы учета динамических нелинейностей при выборе параметров регулятора ОИН и РППН рассмотрены недостаточно, а работы, связанные с исследованием нелинейной динамики однофазных инверторов напряжения [14–17] посвящены лишь изучению физических явлений в таких системах.

Как известно, в системах рассматриваемого класса возможно возникновение нелинейных колебаний при неверно выбранных параметрах регулятора. Такие режимы сопровождаются существенным искажением синусоидальности выходного напряжения и не могут быть предсказаны усредненными малосигнальными моделями. С точки зрения теории управления ОИН являются нелинейными неавтономными динамическими системами, которые при анализе сводятся к системам с дискретным временем и могут быть описаны нелинейными разностными уравнениями. Их основным режимом работы является периодический режим. С позиций теории неавтономных динамических систем в ОИН имеются два внешних периодиче-

ских воздействия: одно определяется источником синусоидального задающего сигнала, а другое – источником тактовых импульсов в составе широтно-импульсного модулятора. В РППН имеется одно внешнее периодическое воздействие от источника тактовых импульсов. Также в обоих случаях имеется одно внешнее постоянное воздействие в виде входного напряжения.

Именно вопросам применения нелинейных динамических моделей при выборе параметров регулятора ОИН и РППН посвящена данная статья.

### **1. Цель и задачи исследования**

Основной целью данной статьи является сравнительный анализ результатов, полученных с помощью усредненной малосигнальной динамической модели РППН на основе двухполярной реверсивной модуляции (ДРМ) и нелинейной динамической модели ОИН на основе синусоидальной двухполярной реверсивной модуляции (СДРМ). В составе системы управления предполагается использовать пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) [18].

Для достижения заявленной цели требуется решить следующие задачи.

1. Создание нелинейной динамической математической модели преобразователя на основе ДРМ с пропорционально-интегральным регулятором, которая позволяет моделировать электромагнитные процессы в преобразователе с ДРМ как при переменном, так и при постоянном задающем сигнале. Данная модель будет реализована на языке высокого уровня. Такой подход позволяет существенно повысить скорость расчетов по сравнению с существующим программным обеспечением. Также указанная модель позволит моделировать импульсный преобразователь на основе ДРМ с постоянным выходным напряжением.

2. Разработка малосигнальной динамической модели рассматриваемого преобразователя.

3. Проведение сравнительного анализа результатов расчета, полученных с помощью усредненной малосигнальной динамической модели, с результатами расчета, полученными с помощью нелинейной динамической модели.

Решение указанных задач позволит выявить основные проблемы обоих методов анализа динамики ОИН и РППН и сформировать основные подходы к выбору параметров регулятора с учетом динамических нелинейностей.

### **2. Описание объекта исследования**

Структурная схема преобразователя на основе ДРМ с системой управления, реализующей обратную связь по мгновенному значению выходного напряжения, представлена на рис. 1, а. Она является традиционной и может быть реализована в том числе с использованием современных микроконтроллеров.

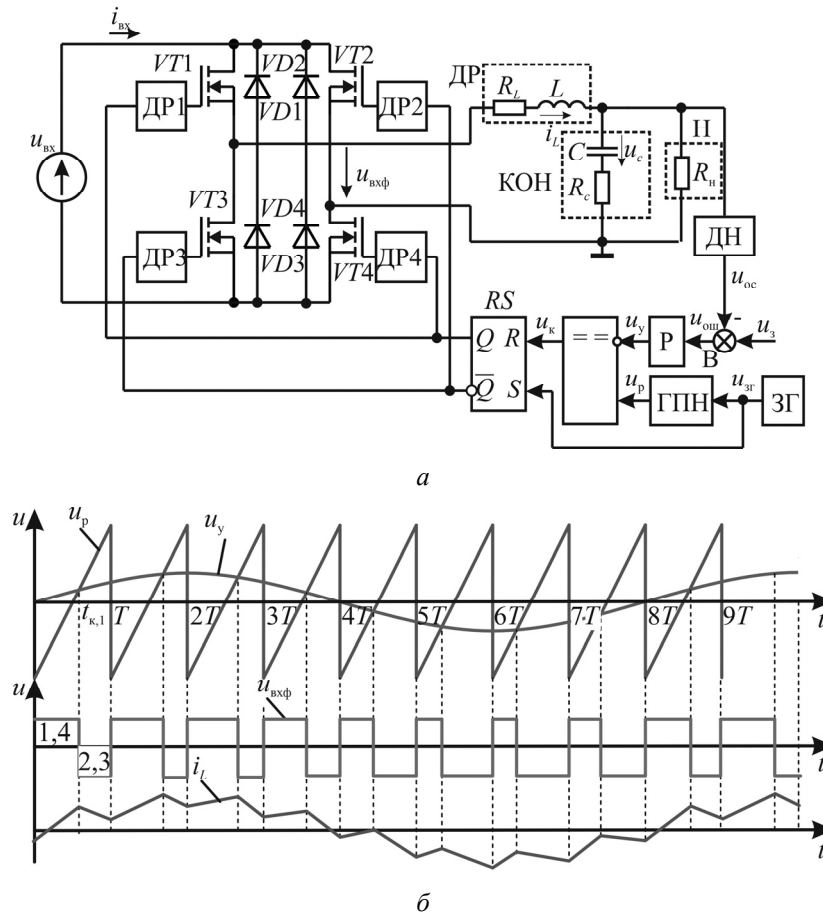


Рис. 1 – К описанию преобразователя на основе двухполярной реверсивной модуляции:

*a* – структурная схема; *б* – временные диаграммы

Fig. 1 – Description of the converter based on bipolar reversible modulation:

*a* – block diagram; *b* – timing diagrams

Рассматриваемое устройство состоит из силовой части, в состав которой входят силовые транзисторы  $VT1-VT4$ , параллельно которым подключены обратные диоды  $VD1-VD4$ , силового фильтра, который состоит из дросселя ДР с индуктивностью  $L$  и последовательным сопротивлением  $R_L$ , конденсатора КОН с емкостью  $C$  и последовательным сопротивлением  $R_C$ . На вход инвертора подключен источник напряжения  $U_{вх}$  с выходным напряжением  $u_{вх}$ . К выходу инвертора подключена активная нагрузка Н с сопротивлением  $R_H$ .

Система управления включает: датчик напряжения ДН, вычитатель В, генератор пилообразного (развертывающего) напряжения ГПН, регулятор Р, компаратор «=», триггер-защелку RS, драйверы ключей ДР1–ДР4.

На рис. 1, *a* использованы следующие обозначения:  $u_{вх}$  – входное напряжение;  $u_{вхф}$  – входное напряжение фильтра;  $i_L$  – ток дросселя;

$u_c$  – напряжение на конденсаторе;  $u_{oc}$  – сигнал обратной связи с выхода датчика выходного напряжения;  $u_z$  – задающий сигнал;  $u_{ош}$  – сигнал ошибки;  $u_y$  – сигнал управления;  $u_{zg}$  – выходной сигнал задающего генератора, формирующего короткие тактовые импульсы в начале каждого тактового интервала;  $u_k$  – выходной сигнал ШИМ-компаратора;  $u_p$  – развертывающее напряжение.

Задающий сигнал определяется по выражению

$$u_z(t) = U_z + u_{zm} \sin(\omega_c t), \quad (1)$$

где  $U_z$  – постоянная составляющая сигнала задания;  $u_{zm}$  – амплитуда переменной составляющей сигнала задания;  $\omega_c$  – круговая частота сигнала задания. При этом  $\omega_{кв} / \omega_c = q$ , где  $\omega_{кв}$  – круговая частота квантования (частота ШИМ);  $q$  – кратность квантования. Для ОИН  $U_z = 0$ , а для РППН  $u_{zm} = 0$ .

На рис. 1, б представлены временные диаграммы, характеризующие работу ОИН. Ключи включаются попарно (номера включенных ключей отмечены на рис. 1, б) и формируют на входе фильтра двухполярные импульсы. Длительность подынтервалов положительного и отрицательного напряжения на входе фильтра изменяется по синусоидальному закону. На рис. 1, б начало тактового интервала с номером  $k$  обозначается как  $(k-1)T$ . Момент коммутации ключей внутри  $k$ -го тактового интервала обозначается как  $t_{к,k}$ . Остальные обозначения соответствуют рис. 1, а.

### 3. Нелинейная математическая модель однофазного инвертора на основе двухполярной реверсивной модуляции

Вначале рассмотрим нелинейную динамическую модель ОИН и РППН на основе ДРМ. Как упоминалось ранее, в рассматриваемой системе предполагается использовать ПИ-регулятор, передаточная функция которого имеет вид

$$W_p(p) = K_{\Pi} + \frac{1}{T_{\Pi} p + K},$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент пропорциональной части регулятора;  $T_{\Pi}$  – постоянная времени интегрирования интегратора;  $K$  – относительно малый коэффициент, учитывающий неидеальность интегратора.

Математические модели таких систем являются кусочно-линейными [12, 13]. В данном случае на каждом подынтервале неизменности топологии силовой части электромагнитные процессы описываются системой линейных дифференциальных уравнений. Как следует из рис. 1, а, особенностью рассматриваемого преобразователя является то, что сигнал задания  $u_z$  в составе сигнала ошибки  $u_{ош} = u_z - u_{oc}$  подается на вход регулятора, так что он будет входить в состав систем дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в ОИН на каждом подынтервале неизменности топологии силовой части.

Также из рис. 1, б очевидно, что на  $k$ -м тактовом интервале можно выделить два подынтервала:  $(k-1)T \dots t_{k,k}$  и  $t_{k,k} \dots kT$ . С точки зрения математического описания эти два подынтервала отличаются друг от друга только знаком напряжения  $u_{\text{вхф}}$ , так что можно записать обобщенную систему дифференциальных уравнений для указанных подынтервалов:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}(\mathbf{X}, t); \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X}. \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{X} = (i_L u_c u_{\text{и}})^T$  – вектор переменных состояния;  $\mathbf{Y} = (u_{\text{вых}} u_{\text{и}})^T$  – вектор выходов;  $(\cdot)^T$  – операция транспонирования;  $u_{\text{и}}$  – выходное напряжение интегратора в составе ПИ-регулятора;  $\mathbf{U}$  – вектор внешних (управляющих) воздействий;  $\mathbf{A}$  – системная матрица;  $\mathbf{B}$  – матрица управления;  $\mathbf{C}$  – матрица выхода. При этом

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{R_L + R_{\text{н}} \parallel R_c}{L_{\phi}} & -\frac{R_{\text{н}}}{L_{\phi}(R_c + R_{\text{н}})} & 0 \\ \frac{R_{\text{н}}}{C_{\phi}(R_c + R_{\text{н}})} & -\frac{1}{C_{\phi}(R_c + R_{\text{н}})} & 0 \\ -\frac{R_{\text{н}} \parallel R_c K_{\text{ос}}}{T_{\text{и}}} & \frac{R_{\text{н}} K_{\text{ос}}}{T_{\text{и}}(R_c + R_{\text{н}})} & -\frac{K}{T_{\text{и}}} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_{\phi}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{и}}} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} R_{\text{н}} \parallel R_c & \frac{R_{\text{н}}}{R_c + R_{\text{н}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{\text{и}}} \end{pmatrix}; \quad R_{\text{н}} \parallel R_c = \frac{R_{\text{н}} R_c}{R_{\text{н}} + R_c}.$$

Как видно из системы (2), вектор управляющих воздействий зависит не только от времени, но и от вектора переменных состояния, что говорит о нелинейности системы (2).

Вектор управляющих воздействий имеет вид

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} U_{\text{вх}} K F(\mathbf{X}, t) \\ 0 \\ U_3 + u_{3m} \sin(\omega_c t) \end{pmatrix},$$

где  $K F(\mathbf{X}, t)$  – коммутационная функция, которая определяется по выражению

$$K F(\mathbf{X}, t) = \text{sign}(\xi(\mathbf{X}, t));$$

$\xi(\mathbf{X}, t)$  – переключающая функция, задаваемая выражением

$$\begin{aligned}\xi(\mathbf{X}, t) &= u_y(t) - u_p(t) = \\ &= K_{\Pi} (U_3 + u_{3m} \sin(\omega_c t) - C_1 \mathbf{Y} K_{oc}) + C_2 \mathbf{Y} - u_p(t).\end{aligned}\quad (3)$$

Временная зависимость двухполярного развертывающего пилообразного сигнала  $u_p$  (рис. 1, а) задается выражением

$$u_p(t) = 2U_{pm} \left( \frac{t}{T} - E\left(\frac{t}{T}\right) \right) - U_{pm},$$

где функция вида  $E(x)$  – целочисленная функция Антье;  $U_{pm}$  – амплитуда развертывающего сигнала.

Из выражения (3) видно: если  $u_y > u_p$ , то  $\xi(\mathbf{X}, t) > 0$  и  $KF(\mathbf{X}, t) = 1$ ; если  $u_y < u_p$ , то  $\xi(\mathbf{X}, t) < 0$  и  $KF(\mathbf{X}, t) = -1$ .

Выражение (2) для определенного  $i$ -го подынтервала неизменности топологии силовой части на  $k$ -м тактовом интервале может быть представлено в виде

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{X}}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}_{dc} \mathbf{U}_{dc} + \mathbf{B}_{ac} \mathbf{U}_{ac}(t); \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X},\end{aligned}\quad (4)$$

где  $\mathbf{B}_{dc}$  – матрица управления для постоянных составляющих управляющих воздействий;  $\mathbf{B}_{ac}$  – матрица управления для переменных составляющих управляющих воздействий;  $\mathbf{U}_{dc}$  – вектор постоянных составляющих управляющих воздействий;  $\mathbf{U}_{ac}$  – вектор переменных составляющих управляющих воздействий:

$$\begin{aligned}\mathbf{B}_{dc} &= \begin{pmatrix} -\frac{1}{L_{\Phi}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{и}} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_{ac} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{и}} \end{pmatrix}; \\ \mathbf{U}_{dc} &= \begin{pmatrix} (-1)^{i+1} U_{BX} \\ 0 \\ U_3 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{U}_{ac} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ U_3 + u_{3m} \sin(\omega_c t) \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

Множитель  $(-1)^{i+1}$  в одном из элементов вектора  $\mathbf{U}_{dc}$  означает, что данный элемент принимает положительное или отрицательное значение в зависимости от значения функции  $KF(\mathbf{X}, t)$  на  $i$ -м подынтервале неизменности топологии силовой части ОИИ.

Решение уравнения (4) на  $i$ -м подынтервале ( $I = 1, 2$ ) неизменности топологии силовой части в пределах  $k$ -го тактового интервала имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) = & \mathbf{M}_e(t, t_{0,i}) \mathbf{X}_{0i} + (\mathbf{M}_e(t, t_{0,i}) - \mathbf{E}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_{dc} \mathbf{U}_{dc} - \\ & - \mathbf{M} [\Phi_{ac}(t) - \mathbf{M}_e(t, t_{0,i}) \Phi_{ac}(t_{0,i})], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_{ac}(t) &= \mathbf{B}_{ac} \mathbf{U}'_{ac}(t) \omega_c + \mathbf{A} \mathbf{B}_{ac} \mathbf{U}_{ac}(t); \\ \mathbf{M}_e(t) &= e^{\mathbf{A}(t-t_{0,i})}; \quad \mathbf{M} = (\mathbf{E} \omega_c^2 + \mathbf{A}^2)^{-1}; \\ \mathbf{U}'_{ac}(t) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{3m} \omega_c \cos(\omega_c t) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$\mathbf{X}_{0,i}$  – вектор переменных состояния в начале  $i$ -го подынтервала неизменности топологии силовой части в пределах  $k$ -го тактового интервала;  $t_{0,i}$  – начало  $i$ -го подынтервала неизменности топологии силовой части в пределах  $k$ -го тактового интервала ( $t_{0,1} = (k-1)T, t_{0,2} = t_{k,k}$ ).

С помощью формулы (5) можно рассчитывать временные зависимости фазовых переменных на  $i$ -м подынтервале неизменности топологии силовой части, а при переходе к  $i+1$  подынтервалу использовать метод припасовывания.

Введем обозначения:  $\mathbf{X}_{k-1}$  – вектор переменных состояния в момент  $(k-1)T$ , а  $\mathbf{X}_k$  – в момент  $kT$ .

На основе формулы (5) можно найти связь вида

$$\mathbf{X}_k = \Psi(\mathbf{X}_{k-1}). \quad (6)$$

Для этого на основании формулы (5) при  $t = t_{k,1}, t_{0,1} = (k-1)T$  и  $\mathbf{X}_{0,1} = \mathbf{X}_{k-1}$  рассчитывается вектор переменных состояния  $\mathbf{X}_{tk1}$  в момент времени  $t_{k,1}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{tk1} = & \mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) \mathbf{X}_{k-1} + (\mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) - \mathbf{E}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_{dc} \mathbf{U}_{dc} - \\ & - \mathbf{M} [\Phi_{ac}(t_{k,1}) - \mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) \Phi_{ac}((k-1)T)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Далее, считая  $\mathbf{X}_{02} = \mathbf{X}_{tkk}, t = kT, t_{0,2} = t_{k,1}$ , подставляем уравнение (6) в формулу (5) и имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k = & \mathbf{M}_e(kT, t_{k,1}) \left\{ \mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) \mathbf{X}_{k-1} + (\mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) - \mathbf{E}) \times \right. \\ & \times \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_{dc} \mathbf{U}_{dc} - \mathbf{M} [\Phi_{ac}(t_{k,1}) - \mathbf{M}_e(t_{k,1}, (k-1)T) \Phi_{ac}((k-1)T)] \Big\} + \\ & + (\mathbf{M}_e(kT, t_{k,1}) - \mathbf{E}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}_{dc} \mathbf{U}_{dc} - \mathbf{M} [\Phi_{ac}(kT) - \mathbf{M}_e(kT, t_{k,1}) \Phi_{ac}(t_{k,1})]. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, выражение (8) раскрывает зависимость (6).

Выражение (6) представляет собой рекуррентную формулу, где следующее значение последовательности ( $\mathbf{X}_k$ ) рассчитывается на основе преды-

дущего значения  $\mathbf{X}_{k-1}$ . По сути формула (6) является нелинейным разностным уравнением (отображением Пуанкаре), где при последовательных итерациях в установившемся режиме наблюдается определенное количество неподвижных точек отображения. Также стоит заметить, что при постоянном задающем сигнале ( $u_{zm} = 0$ ) выражение (8) можно существенно упростить, что снизит требования к вычислительным ресурсам.

Для использования формулы (8) необходимо на каждой  $k$ -й итерации вычислять момент коммутации  $t_{k,k}$ , который может быть рассчитан с учетом формулы (3) на основе уравнения

$$\xi(\mathbf{X}, t) = 0.$$

Данное уравнение является трансцендентным и решается с помощью численных методов на каждой итерации отображения [формула (6)].

Далее рассмотрим понятие желаемого динамического режима импульсных преобразователей. Как отмечается в [12, 13], для системы с синусоидальной широтно-импульсной модуляцией под желаемым динамическим режимом подразумевается режим, в котором частота пульсаций выходного напряжения равна частоте задающего сигнала. В нежелательных режимах она может быть в  $m$  раз меньше ( $m$ -кратность цикла) или вообще могут наблюдаться хаотические колебания. В желаемом режиме  $m = 1$ , и данный режим будем называть 1-циклом. Также заметим, что в желаемом режиме на периоде выходного напряжения укладывается  $q$  тактовых интервалов. Для системы с постоянным задающим сигналом под желаемым 1-циклом понимается такой режим, при котором частота пульсаций выходного напряжения равна частоте квантования широтно-импульсной модуляции.

Оценка локальной устойчивости желаемого динамического режима осуществляется на основе анализа собственных значений матрицы монодромии (мультипликаторов) [12, 13], которая с учетом формулы (6) для 1-цикла ОИН может быть рассчитана как

$$\mathbf{M} = \prod_{i=1}^q \frac{\partial \Psi(\mathbf{X}_{m-i}^*)}{\partial \mathbf{X}_{m-i}}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{X}_{m-i}^*$  – координата неподвижной точки на  $m-i$ -й итерации отображения, описываемого выражением (6).

Координаты неподвижных точек желаемого режима могут быть найдены из системы уравнений

$$\underbrace{\Psi(\Psi(\dots\Psi(\mathbf{X}_1^*)\dots))}_q = \mathbf{X}_1^*. \quad (10)$$

Запись в левой части выражения (10) означает, что осуществлена последовательная подстановка  $q$  раз выражения (6) самого в себя. Система (10) может быть решена с помощью любого численного метода решения нелинейных трансцендентных уравнений. Для нахождения остальных непо-

движных точек  $\mathbf{X}_k^*$ ,  $k = 2, 3 \dots q$  необходимо осуществить  $q - 1$  итераций отображения [выражение (6)] с начальных условий  $\mathbf{X}_1^*$ .

Расчет матрицы монодромии на основе выражения (9) и решение системы (10) для РППН с постоянным задающим сигналом осуществляется при  $u_{zm} = 0$  и  $q = 1$ .

#### **4. Малосигнальная усредненная математическая модель однофазного инвертора на основе двухполярной реверсивной модуляции**

Рассмотрим усредненную малосигнальную динамическую модель в виде передаточной функции преобразователя на основе ДРМ, которая используется при выборе параметров как регулятора преобразователей с постоянным выходным напряжением (РППН), так и преобразователей с переменным выходным напряжением (ОИН). Также отметим, что в системе на рис. 1, б развертывающее напряжение двухполярное, которое изменяется от  $-U_{pm}$  до  $+U_{pm}$ .

Преобразователь на основе ДРМ обладает линейной статической регулировочной характеристикой, поэтому для получения его передаточной функции достаточно знать передаточную функцию выходного фильтра и передаточную функцию импульсного модулятора.

Малосигнальная передаточная функция преобразователя с ДРМ может быть представлена в виде

$$W_{\text{ОИН}}(s) = \frac{\hat{u}_{\text{ВЫХ}}(s)}{\hat{u}_y(s)} = W_{\text{ИМ}}(s)W_{\text{Ф}}(s), \quad (11)$$

где передаточная функция импульсного модулятора рассчитывается по выражению

$$W_{\text{ИМ}}(s) = \frac{\hat{u}_{\text{ВЫХ.ИМ}}}{\hat{u}_y(s)}, \quad (12)$$

где  $\hat{u}_{\text{ВЫХ.ИМ}}$  — переменная малосигнальная составляющая выходного напряжения импульсного модулятора.

Знак «^» над переменными в формулах (11), (12) и (14) означает, что в этих выражениях используются малые отклонения указанных переменных.

Выходное напряжение преобразователя на основе ДРМ при  $\gamma = \text{const}$  вычисляется по выражению

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}(2\gamma - 1), \quad (13)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  — среднее значение выходного напряжения преобразователя;  $U_{\text{ВХ}}$  — среднее значение входного напряжения преобразователя;  $\gamma$  — статический коэффициент заполнения.

При этом стоит отметить, что средние значения выходного напряжения импульсного модулятора и выходного напряжения преобразователя совпадают.

На основе уравнения (13) запишем выражение для малых сигналов:

$$\hat{u}_{\text{вых.им}} = U_{\text{вх}} 2\hat{\gamma}, \quad (14)$$

где  $\hat{u}_{\text{вых.им}}$  — переменная малосигнальная составляющая выходного напряжения импульсного модулятора.

Влияние малых отклонений  $U_{\text{вх}}$  в данной работе не рассматривается.

На следующем этапе найдем связь  $\hat{u}_y$  и  $\hat{\gamma}$ .

Анализ рис. 1 показывает, что для статических значений указанных переменных

$$\gamma = \frac{U_y + 0,5U_{\text{pm}}}{2U_{\text{pm}}}.$$

Записывая данное выражение для малых сигналов, имеем

$$\hat{\gamma} = \frac{\hat{u}_y}{2U_{\text{pm}}}. \quad (15)$$

Таким образом, подставляя выражение (15) в уравнение (14), имеем

$$\hat{u}_{\text{вых.им}} = U_{\text{вх}} 2 \frac{\hat{u}_y}{2U_{\text{pm}}}.$$

Отсюда

$$W_{\text{им}}(s) = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{pm}}}. \quad (16)$$

Передаточная функция Г-образного LC-фильтра, используемая в выражении (11), имеет вид [9]

$$W_{\Phi}(p) = \frac{K_{\Phi}(\tau_c p + 1)}{T_{\Phi}^2 p^2 + 2\xi T_{\Phi} p + 1}, \quad (17)$$

где

$$T_{\Phi} = \sqrt{\frac{LC(R_L + R_c)}{R_L + R_H}}; \quad \xi = \frac{L + C[R_L(R_c + R_H) + R_c R_H]}{2\sqrt{LC(R_c + R_H)(R_L + R_H)}};$$

$$K_{\Phi} = \frac{R_H}{R_L + R_H}; \quad \tau_c = R_c C.$$

На основе выражений (11), (16) и (17) передаточная функция разомкнутого контура имеет вид

$$W_{\text{раз}}(p) = W_p(p)W_{\text{им}}(p)W_{\Phi}(p)K_{\text{ос}}. \quad (18)$$

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_p(p)W_{\text{им}}(p)W_{\text{ф}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (19)$$

Устойчивость замкнутой линейной системы автоматического управления для удобства обеспечивается средствами MatLab на основе корней характеристического уравнения замкнутой системы, получаемого по выражению (19). Как известно, если действительная часть хотя бы одного корня характеристического уравнения больше нуля, то система является неустойчивой [16].

Передаточная функция по ошибке может быть представлена как

$$W_{\text{ош}}(p) = \frac{1}{1 + W_{\text{раз}}(p)}. \quad (20)$$

Частотная зависимость амплитуды ошибки на основании уравнения (20) может быть найдена как

$$A_{\text{ош}}(\omega) = \left[ \left( \omega^2 \left[ a_0^2 + \omega^2 (a_1^2 - 2a_0a_2) + a_2^2\omega^4 \right] \right) \div \left( (K_{\text{ос}}b_0K_{\text{и}})^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \omega^2 \left[ (a_0 + K_{\text{ос}}b_0K_{\text{п}})^2 - 2c_0K_{\text{и}}a_1 \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + \omega^4 \left[ (a_1 + K_{\text{ос}}b_1K_{\text{п}})^2 - 2(a_0 + K_{\text{ос}}b_0K_{\text{п}})a_2 \right] \right) \right]^{1/2}, \quad (21)$$

где

$$a_2 = U_{\text{pm}}; \quad a_1 = U_{\text{pm}} \left[ \frac{1}{L} (R_L + R_{\text{н}} \parallel R_c) + \frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_{\text{н}} + R_c} \right) \right]; \\ a_0 = U_{\text{pm}} \frac{R_L + R_{\text{н}}}{LC(R_{\text{н}} + R_c)}; \quad b_1 = \frac{R_{\text{н}}U_{\text{вх}}}{LC(R_{\text{н}} + R_c)} R_c C; \quad b_0 = \frac{R_{\text{н}}U_{\text{вх}}}{LC(R_{\text{н}} + R_c)}.$$

## 5. Исследование динамики преобразователя на основе двухполярной реверсивной модуляции

В данном разделе исследована динамика преобразователя напряжения при использовании линейной и нелинейной динамических моделей как при постоянном (РППН), так и при переменном (ОИН) задающем сигнале.

Будут использованы следующие параметры системы:  $U_{\text{вх}} = 250$  В;  $R_{\text{н}} = 12,5$  Ом;  $R_L = 1$  Ом;  $L = 0,00227$  Гн;  $R_c = 20$  мОм;  $C = 20$  мкФ;  $K_{\text{ос}} = 0,05$ ;  $U_{\text{pm}} = 10$  В;  $T = 0,0001$  с;  $q = 200$ .

Сначала рассмотрим карты динамических режимов, которые представлены на рис. 2, а, в и характеризуют РППН с постоянным задающим сигналом  $U_z$  (в данном случае на выходе будет постоянное напряжение). На рис. 2, б, г представлены диаграммы размаха колебаний, соответствующие картам на рис. 2, а, в.

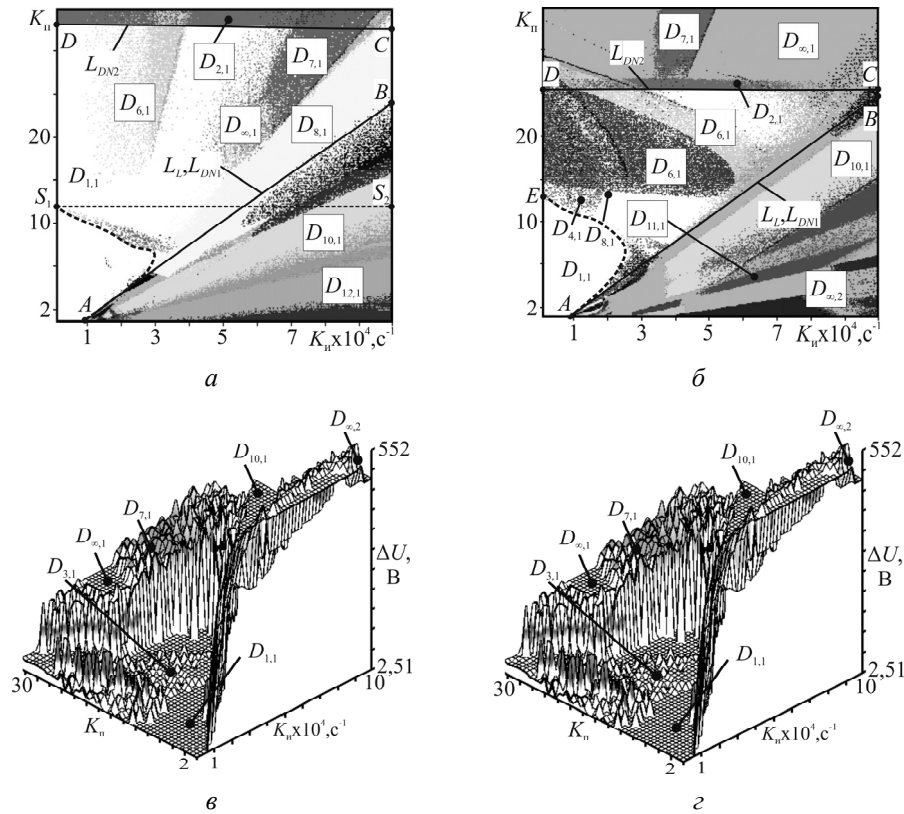


Рис. 2 – Двухпараметрические диаграммы для реверсивного преобразователя постоянного напряжения на основе ДРМ:

$a$  – карта динамических режимов при  $U_3 = 1$  В;  $b$  – диаграмма действующего значения сигнала ошибки при  $U_3 = 1$  В;  $c$  – карта динамических режимов при  $U_3 = 6$  В;  $d$  – диаграмма действующего значения сигнала ошибки при  $U_3 = 6$  В

Fig. 2 – Two-parameter diagrams for a reversible DC-DC converter based on a BRM:

$a$  – is a map of dynamic modes at  $U_{ref} = 1$  V;  $b$  – is a diagram of the effective value of the error signal at  $U_{ref} = 1$  V;  $c$  – is a map of dynamic modes at  $U_{ref} = 6$  V;  $d$  – is a diagram of the effective value of the error signal at  $U_{ref} = 6$  V

Данные диаграммы построены в пространстве двух параметров  $K_{и} = 1/T_{и}$  и коэффициента  $K_{п}$ . Параметры  $K_{п}$  и  $T_{и}$  входят в состав передаточной функции, характеризующей ПИ-регулятор.

На картах (рис. 2,  $a$ ,  $c$ ) разными оттенками и символами  $D_{i,j}$  отмечены области существования различных динамических режимов. В обозначении  $D_{i,j}$  индекс  $i$  – кратность цикла в соответствующей области, индекс  $j$  – номер области на карте с кратностью цикла  $i$ . В общем случае на карте может присутствовать две и более несвязанные области с одинаковой кратностью цикла в различных областях карты. Также на картах отмечены границы  $AB$  и  $CD$  ( $L_{DN1}$  и  $L_{DN2}$  соответственно), которые определяют границы устойчивости желаемого динамического режима. Именно при пере-

сечении этих границ модуль старшего мультипликатора желаемого режима (1-цикла) пересекает единицу. Также на картах приведена граница  $L_L$ , которая была получена на основе анализа корней характеристического уравнения линейной динамической модели замкнутой системы (19). При этом она полностью совпадает с  $L_{DN1}$ , т. е. с этой точки зрения результаты линейной и нелинейной модели совпадают. Однако граница  $L_{DN2}$  малосигнальной усредненной моделью предсказана не была, что говорит об ограничениях этой модели.

Из рис. 2, б, г видно, что в областях ниже линии  $AB$  размах колебаний может достигать нескольких сотен вольт, в то время как в областях  $D_{1,1}$  он составляет единицы вольт.

Анализ нелинейной динамической модели показал, что желаемый динамический режим устойчив в областях  $D_{1,1}$  на рис. 2, а, в, т. е. ниже  $L_{DN2}$  и левее  $L_{DN1}$ . При этом стоит заметить, что в обозначенных областях существуют и области нежелательных режимов  $D_{6,1}$ ,  $D_{7,1}$ ,  $D_{8,1}$  и т. п. (рис. 2, а) и области  $D_{3,1}$ ,  $D_{6,1}$ ,  $D_{4,1}$ ,  $D_{8,1}$ ,  $D_{\infty,1}$  (рис. 2, в). Данные области, как видно на рис. 2, неодносвязны, что обусловлено тем, что карты динамических режимов строились со случайных начальных условий и в зависимости от этих условий система попадала либо в желаемый режим  $D_{1,1}$ , либо в нежелательный режим. Это так называемые области мультистабильности. Также области мультистабильности в общем случае могут образовываться несколькими нежелательными режимами.

На рис. 3 представлена бифуркационная диаграмма, которая соответствует сечению  $S_1S_2$  на рис. 2, а, соответствующему  $K_{\Pi} = 12$ . Она показывает эволюцию координат неподвижных точек динамических режимов (в данном случае для каждой точки рассматривается одна координата, соответствующая  $u_c$ ) в зависимости от  $K_{\Pi}$ . До  $K_{\Pi 1} = 41035 \text{ с}^{-1}$  в системе существовал желаемый 1-цикл  $V_{1,1}$ , соответствующий области  $D_{1,1}$  на рис. 2, а. При  $K_{\Pi} > K_{\Pi 1}$  в системе одновременно сосуществуют режимы  $V_{1,1}$  и  $V_{8,1}$  (соответствует области  $D_{8,1}$  на рис. 2, а). В точке  $K_{\Pi 2} = 56188 \text{ с}^{-1}$  желаемый 1-цикл становится неустойчивым и не реализуется при моделировании, но продолжает существовать. После достижения  $K_{\Pi 3} = 60470 \text{ с}^{-1}$  в системе существуют 8-цикл  $V_{8,1}$  и 16-цикл (на рис. 2, а и рис. 3 не отмечены специальными буквенными обозначениями).

Таким образом, видно, что анализ локальной устойчивости желаемого динамического режима, линеаризованного в рабочей точке отображения Пуанкаре, дает более точные результаты по сравнению с малосигнальной усредненной динамической моделью (выявляет границу  $L_{DN2}$  на рис. 2), но всё же не учитывает мультистабильность, т. е. устойчивость в целом. Мультистабильность может быть выявлена только при анализе карт динамических режимов, полученных на основе анализа временных зависимостей, рассчитанных со случайных начальных условий.

На основании анализа рис. 2 можно сделать вывод, что области допустимых значений параметров ПИ-регулятора, при которых однозначно

наблюдается желаемый динамический режим, ограничены справа кривыми  $AS_1$  (рис. 2, а) и  $AE$  (рис. 2, в).

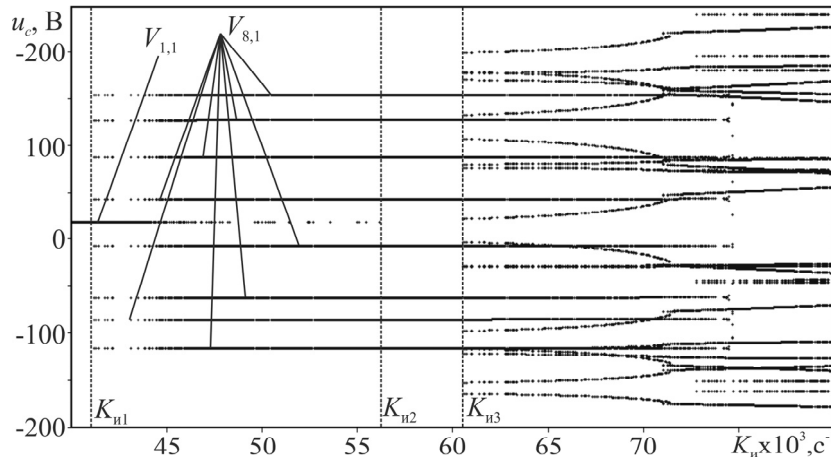


Рис. 3 – Бифуркационная диаграмма для реверсивного преобразователя постоянного напряжения на основе ДРМ при  $U_3 = 1$  В и  $K_p = 12$

Fig. 3 – Bifurcation diagram for a reversible DC/DC converter based on a BRM at  $U_{ref} = 1$  V and  $K_p = 12$

На следующем этапе сравним карты динамических режимов, полученные для РППН, с картами динамических режимов ОИН с синусоидальным задающим сигналом (рис. 4) при его разных амплитудах. Анализируя данные карты, следует помнить, что при переменном задающем сигнале рабочая точка системы перемещается в широком диапазоне за период задающего сигнала. Так, для  $u_{zm} = 6$  В сигнал задания в какой-то момент принимает значения  $U_3 = 1$  В и  $U_3 = 6$  В. Таким образом, карты на рис. 2 и 4 можно сравнивать лишь качественно, отмечая некоторые закономерности.

Наиболее важным выводом из анализа рис. 2 и 4 является то, что на всех картах динамических режимов просматривается линия  $AB$ , которая получена с помощью анализа как линеаризованного вблизи неподвижных точек желаемого динамического режима отображения Пуанкаре, так и характеристического уравнения линейной динамической модели. Причем на всех картах слева от нее находятся области мультистабильности, когда устойчив как желаемый режим, так и нежелательные режимы. Однако характерной чертой карт на рис. 4 является существенное сокращение площади областей мультистабильности выше линии  $AB$ . Также на рис. 4, а отсутствует линия  $CD$ , в отличие от рис. 2.

На рис. 4, б, г представлены диаграммы действующего значения ошибки  $U_{ош.эф}$ , соответствующие картам на рис. 4, а, в. Как видно на рисунке, в областях нежелательных режимов действующее значение сигнала ошибки больше (до 200 раз), чем в областях желаемого динамического режима  $D_{1,1}$ . На рисунке символами  $D_{i,j}$  отмечены области, соответствующие таким же областям на картах динамических режимов.

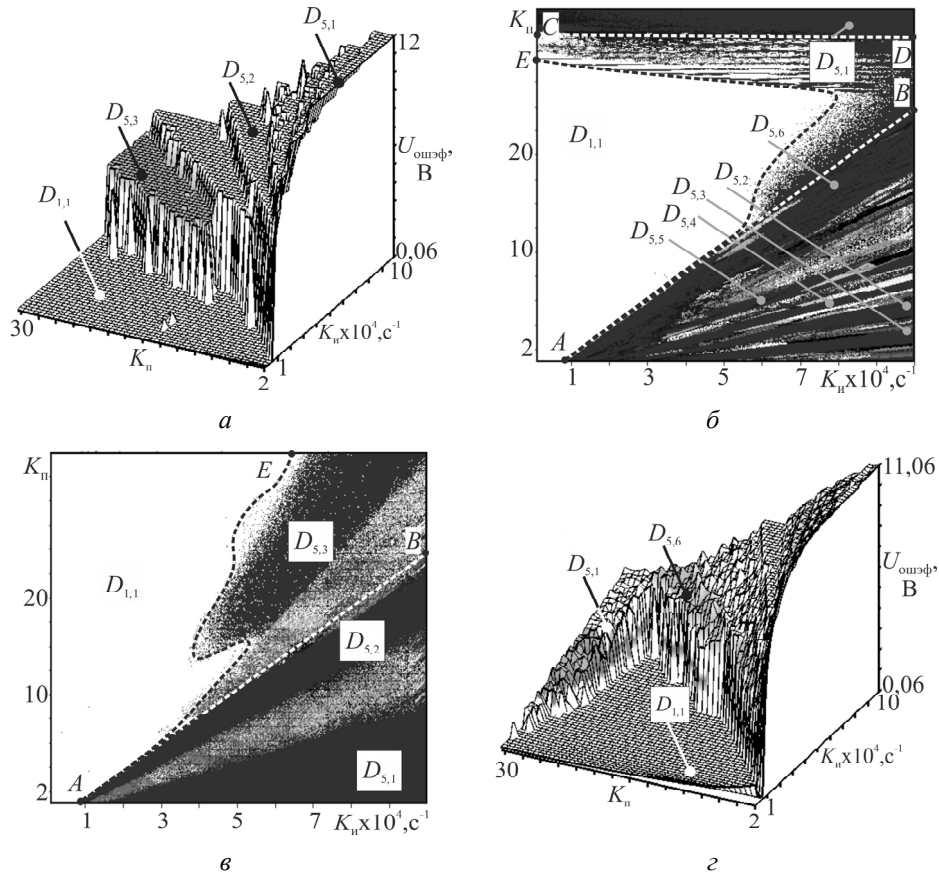


Рис. 4 – Двухпараметрические диаграммы однофазного инвертора напряжения на основе ДРМ:

$a$  – карта динамических режимов при  $u_{зм} = 1$  В;  $b$  – диаграмма действующего значения сигнала ошибки при  $u_{зм} = 1$  В;  $в$  – карта динамических режимов при  $u_{зм} = 6$  В;  $г$  – диаграмма действующего значения сигнала ошибки при  $u_{зм} = 6$  В

Fig. 4 – Two-parameter diagrams of a single-phase voltage inverter based on the BRM:

$a$  – is a map of dynamic modes at  $u_{refm} = 1$  V;  $b$  – is a diagram of the effective value of the error signal at  $u_{refm} = 1$  V;  $c$  – is a map of dynamic modes at  $u_{refm} = 6$  V;  $d$  – is a diagram of the effective value of the error signal at  $u_{refm} = 6$  V

Анализ показал, что области желаемого динамического режима, ограниченные справа на рис. 4,  $a, в$  линиями  $AE$ , существенно больше аналогичных областей на рис. 2. Это говорит о том, что выбор параметров регулятора ОИН на основе ДРМ на основе карт динамических режимов РППН (рис. 2) в данном случае привел бы к использованию меньших значений  $K_{и}$ , что негативно повлияло бы на быстродействие и, соответственно, на динамическую ошибку.

На следующем этапе рассмотрим двухпараметрическую диаграмму ошибки (рис. 5), которая была получена на основе выражения (21). Очевидно, что она представляет собой зависимость амплитуды ошибки при

воздействии синусоидального задающего сигнала с частотой  $\omega_c$  и амплитудой 1 В. Как видно на рис. 5, с ростом  $K_{\text{и}}$  и  $K_{\text{п}}$  амплитуда ошибки снижается, но при  $K_{\text{и}} = 10^5$  и  $K_{\text{п}} = 2$  наблюдается максимальная ошибка.

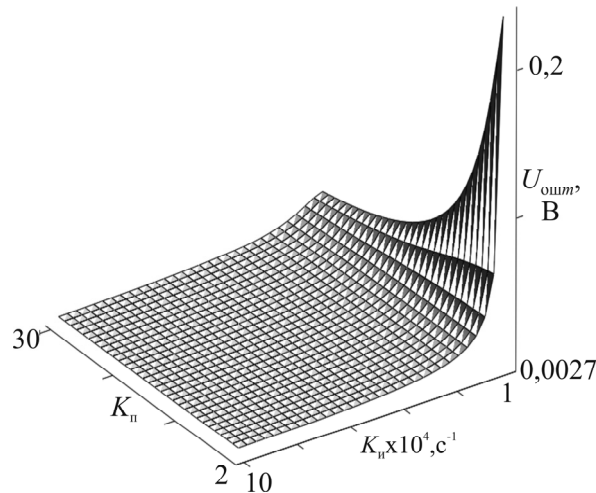


Рис. 5 – Двухпараметрическая диаграмма амплитуды ошибки линейной динамической модели при  $u_{\text{зм}} = 1$  В

Fig. 5 – Two-parameter diagram of the error amplitude of the linear dynamic model at  $u_{\text{refm}} = 1$  V

### Заключение

Обеспечение требуемой динамики импульсных преобразователей напряжения всегда являлось достаточно специфической задачей, где требуется учет динамических нелинейностей. В статье было показано, что усредненные малосигнальные модели лишь частично отражают реальное поведение системы при тех или иных параметрах регулятора и в некоторых областях в пространстве параметров регулятора они не предсказали появление нежелательных режимов. Кроме того, малосигнальное моделирование не позволяет оценить реальную динамическую ошибку, которая будет наблюдаться при работе ОИИ. Стоит отметить и особенности применения нелинейных динамических моделей. При их использовании оценивается локальная устойчивость желаемого динамического режима, а не устойчивость в целом. Какие-то универсальные алгоритмы для решения этой задачи создать затруднительно в силу специфики рассматриваемой системы. Поэтому оценка устойчивости в целом может быть проведена лишь на основе анализа карт динамических режимов, построенных со случайных начальных условий, что позволяет оценить границы областей мультистабильности лишь приближенно, но, как правило, этой точности хватает для принятия научно обоснованного решения. Результаты анализа динамики, полученные с помощью более простых нелинейных динамиче-

ских моделей РППН, нельзя в полной мере распространить на ОИН, построенных по тем же схемам, несмотря на общие закономерности, наблюдаемые при сравнении карт динамических режимов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Чаплыгин Е.Е., Вилков А.Е.** Исследование коэффициента передачи инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией // *Электричество*. – 2010. – № 8. – С. 52–59.
2. **Divan D.M.** Inverter topologies and control techniques for sinusoidal output power supplies // *APEC '91: Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition*. – Dallas, TX, USA: IEEE, 1991. – P. 81–87.
3. **Priyadarshini S., Alam A., Shekhar S.** Design of PI and PR controller in various reference frames for inverter control // *2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems*. – Dehradun, India, 2024. – С. 1–6.
4. Comparative study of discrete PI and PR controls for single-phase UPS inverter / M. Parvez, M.F.M. Elias, N.A. Rahim, F. Blaabjerg, D. Abbott, S.F. Al-Sarawi // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 45584–45595.
5. **Yuniahastuti I.T., Senoaji.** Design voltage controller of bipolar SPWM voltage source inverter // *Journal of Advanced Technology and Multidiscipline*. – 2022. – Vol. 1 (2). – P. 45–49.
6. **Сиротский М.С., Пугачев А.А.** Математическое моделирование срока службы свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для источников бесперебойного питания // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. – 2024. – № 1 (23). – С. 81–88.
7. **Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Музыченко Н.М.** Модуляционные источники питания РЭА. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.
8. **Мелешин В.И.** Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
9. **Белов Г.А.** Теория импульсных преобразователей. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – 330 с.
10. **Севернс Р., Блум Г.** Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 294 с.
11. **Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В.** Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. – М.: Горячая линия – Телеком, 2019. – 540 с.
12. **Андриянов А.И.** Развитие теории управления нелинейными динамическими процессами импульсных систем электропитания: дис. ... д-ра техн. наук. – Брянск, 2022. – 515 с.
13. **Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E.** Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems. – Singapore: World Scientific, 2003. – 376 p.
14. **Sun L.-X., Wen Zh.-G., Lu Sh.** Instability analysis and experimental setup of a full-bridge SPWM DC-AC converter // *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – Florence, Italy: IEEE, 2016. – P. 2331–2336.
15. **Avrutin V., Zhusubaliyev Z.T., Mosekilde E.** Border collisions inside the stability domain of a fixed point // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2016. – Vol. 321–322. – P. 1–15.

16. Research on nonlinear phenomena of single-phase H-bridge inverter / Y. Ping, Z. Qunru, X. Zhirong, Y. Haozhe, Z. Yuanhui // 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Hong Kong: IEEE, 2014. – P. 1–6.
17. Li M., Dai D., Ma X. Slow-scale and fast-scale instabilities in voltage-mode controlled full-bridge inverter // Circuits, Systems & Signal Processing. – 2008. – Vol. 27 (6). – P. 811–831.
18. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – М.: Юрайт, 2022. – 277 с.

## STUDY OF CONVERTER DYNAMICS BASED ON BIPOLAR REVERSIBLE MODULATION

Andriyanov A.I.

*Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia*

The object of this study is voltage converters based on bipolar reversible modulation with a constant or alternating output voltage. The subject of the study is the stability of voltage converters based on bipolar reversible modulation. To assess the stability of converters, the article uses two main approaches: stability analysis based on averaged, small-signal dynamic models and stability analysis based on nonlinear dynamic models using the method of point mapping. In the latter case, the stability of the voltage converter was assessed with constant and alternating drive signals for the purpose of a comparative analysis of the results. The article presents an averaged small-signal model and a nonlinear dynamic model of a converter based on bipolar reversible modulation with a proportional-integral controller, which allows for the calculation of electromagnetic processes in the converter with both alternating and constant drive signals. These models make it possible to fully solve the problems posed in this study. To analyze the dynamics, dynamic mode maps were constructed for a converter with a constant reference signal and for a converter with a sinusoidal reference signal, with two different reference parameters. A stability boundary derived from an averaged, small-signal dynamic model was superimposed on these maps. The analysis showed that the averaged, small-signal model is incapable of predicting the occurrence of undesirable dynamic modes in certain regions of the controller parameters. It was also shown that the regions of desirable modes in the controller parameter space are much larger for a converter with a sinusoidal reference signal than for a converter with a constant reference signal, with the same power section parameters.

*Keywords:* single-phase voltage inverter, reversible voltage converter, bipolar reversible modulation, proportional-integral controller, stability, nonlinear dynamic model, desired dynamic mode.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-5-25

## REFERENCES

1. Chaplygin E.E., Vilkov A.E. Issledovanie dinamiki preobrazovatelei na osnove dvukhpolyarnoi rever-sivnoi modulyatsii [Study of converter dynamics based on bipolar reversible modulation]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 8, pp. 52–59. (In Russian).

2. Divan D.M. Inverter topologies and control techniques for sinusoidal output power supplies. *APEC '91: Sixth Annual Applied Power Electronics Conference and Exhibition*, Dallas, TX. IEEE, 1991, pp. 81–87.
3. Priyadarshini S., Alam A., Shekhar S. Design of PI and PR controller in various reference frames for inverter control. *2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems*, Dehradun, India, 2024, pp. 1–6.
4. Parvez M., Elias M.F.M., Rahim N.A., Blaabjerg F., Abbott D., Al-Sarawi S.F. Comparative study of discrete PI and PR controls for single-phase UPS inverter. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 45584–45595.
5. Yuniahastuti I.T., Senoaji. Design voltage controller of bipolar SPWM voltage source inverter. *Journal of Advanced Technology and Multidiscipline*, 2022, vol. 1 (2), pp. 45–49.
6. Sirotskiy M.S., Pugachev A.A. Matematicheskoe modelirovanie sroka sluzhby svintsovo-kislotnykh akkumulyatornykh batarei dlya istochnikov bespereboinogo pitaniya [Mathematical modeling of lifetime of lead acid batteries for uninterruptible power supplies]. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii = Automation and Modeling in Design and Management*, 2024, no. 1 (23), pp. 81–88.
7. Kobzev A.V., Mikhal'chenko G.Ya., Muzychenko N.M. *Modulyatsionnye istochniki pitaniya REA* [Modulating power supplies for electronic equipmen]. Tomsk, Radio i svyaz' Publ., 1990. 336 p.
8. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p.
9. Belov G.A. *Teoriya impul'snykh preobrazovatelei* [Theory of PWM converters]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2016. 330 p.
10. Severns R., Bloom G. *Impul'snye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo elektropitaniya* [Modern DC-to-DC switchmode converter circuits]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. (In Russian).
11. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V. *Ustoichivost' i elektromagnitnaya sovместimost' ustroystv i sistem elektropitaniya* [Stability and electromagnetic compatibility of devices and power supply systems]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2019. 540 p.
12. 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 pulsed power supply systems. Dr. eng. sci. diss.]. Bryansk, 2022. 515 p.
13. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. *Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems*. Singapore, World Scientific, 2003. 376 p.
14. Sun L.-X., Wen Zh.-G., Lu Sh. Instability analysis and experimental setup of a full-bridge SPWM DC-AC converter. *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 2331–2336.
15. Avrutin V., Zhusubaliyev Z.T., Mosekilde E. Border collisions inside the stability domain of a fixed point. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2016, vol. 321–322, pp. 1–15.
16. Ping Y., Qunru Z., Zhirong X., Haozhe Y., Yuanhui Z. Research on nonlinear phenomena of single-phase H-bridge inverter. *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Hong Kong, 2014, pp. 1–6.
17. Li M., Dai D., Ma X. Slow-scale and fast-scale instabilities in voltage-mode controlled full-bridge inverter. *Circuits, Systems & Signal Processing*, 2008, vol. 27 (6), pp. 811–831.
18. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory]. Moscow, Yurait Publ., 2022. 277 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Андрьянов Алексей Иванович** – родился в 1979 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем Брянского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника. Опубликовано 150 научных работ. (Адрес: 241035, Россия, Брянск, бульвар. 50 лет Октября, 7. E-mail: mail@ahaos.ru).

**Andriyanov Alexey Ivanovitch** (b. 1979) – Doctor of Sciences (Eng.), Associate professor, professor, department of Electronic, Radioelectronic and Electrotechnical Systems, Bryansk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics. He is author of 150 scientific papers. (Address: 7, Street, City, bul. 50 let Oktyabrya, Bryansk, Russia. E-mail: mail@ahaos.ru).

*Статья поступила 03 февраля 2026 г.  
Received February 03, 2026*

---

To Reference:

Andriyanov A.I. Issledovanie dinamiki preobrazovatelei na osnove dvukhpolyarnoi reversivnoi modulyatsii [Study of converter dynamics based on bipolar reversible modulation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 5–25. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-5-25.

УДК 621.43.03; 621.43.05

## СОВМЕСТНЫЙ РАСПЫЛ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ

**Е.Б. Бутаков, Е.П. Копьев, И.С. Садкин, Е.Ю. Шадрин**

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН*

В статье представлены результаты экспериментального исследования совместного распыла несмешивающихся жидкостей (дизельное топливо / вода) струей перегретого водяного пара и последующего их сжигания в низкоэмиссионном горелочном устройстве с камерой газогенерации. Показано, что парознергетическая форсунка обеспечивает эффективное диспергирование обеих фаз без предварительного эмульгирования: преобладающий размер капель составляет 10...40 мкм. При добавлении воды в количестве 0,2...0,4 кг/ч к 1 кг/ч топлива достигается снижение максимальной температуры факела на 300...400 °С и уменьшение выбросов  $\text{NO}_x$  на 30...50 %. При дальнейшем увеличении доли воды наблюдается рост концентраций СО и  $\text{C}_n\text{H}_m$ , а также усиление пульсаций пламени. Полученные результаты подтверждают эффективность метода отдельного распыла без эмульгаторов и определяют область оптимальных режимов для сжигания.

*Ключевые слова:* распыление, перегретый пар, несмешивающиеся жидкости, водотопливные системы,  $\text{NO}_x$ , низкоэмиссионное сжигание.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37

### Введение

Жидкое углеводородсодержащее топливо остается основой энергетики благодаря высокой энергоемкости и технологичности хранения. Однако сжигание топлива сопровождается образованием оксидов азота, сажи и СО, что требует совершенствования технологий экологически безопасного использования [1,2]. Наиболее распространенные методы интенсификации и экологизации процесса включают оптимизацию конструкций камер сгорания, применение газов-разбавителей и модификацию состава топлива [3, 4].

Среди направлений модификации особый интерес представляют несмешивающиеся жидкостные системы, позволяющие целенаправленно влиять на тепловой режим пламени и кинетику реакций [5, 6]. Наиболее изучены водно-углеводородные композиции (дизель/мазут и вода), где введение воды снижает пиковую температуру и подавляет термический механизм образования  $\text{NO}_x$  [7]. Аналогичные принципы используются в топливно-окислительных парах [8], металл-водных системах [9], составах для связывания сернистых соединений [10] и смесях углеводородов с аммиаком для снижения  $\text{NO}_x$  [11]. Во всех случаях определяющим фак-

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (126021217042-8).

© 2026 Е.Б. Бутаков, Е.П. Копьев, И.С. Садкин, Е.Ю. Шадрин

тором является качество распыла и смесеобразования, от которого зависят полнота выгорания и уровень выбросов [12].

Технологии распыления подразделяются на эмульсионные и отдельные. Водотопливные эмульсии обеспечивают снижение  $\text{NO}_x$  на 30...50 % и уменьшение сажи [13, 14] за счет понижения температуры пламени и микровзрывного дробления капель [15], что улучшает смесеобразование и выравнивает температурное поле [16, 17]. Однако необходимость использования эмульгаторов, риск расслоения и коррозии, а также дополнительные энергетические затраты ограничивают применение метода [18]. Развитие связано с созданием стабилизированных систем и интеллектуального контроля качества [19].

Альтернативой является отдельный распыл компонентов с их смешением непосредственно в факеле [20]. Такой подход исключает эмульгаторы и обеспечивает гибкое регулирование состава смеси, однако требует точного контроля дисперсности и динамики струи для обеспечения устойчивого горения.

В настоящей работе рассматривается способ отдельного распыла дизельного топлива и воды струей перегретого водяного пара [21]. Метод позволяет сочетать интенсивную атомизацию с дополнительным разбавлением реакционной зоны. Основным научным интересом представляет влияние данного способа на температурную структуру пламени, подавление термических  $\text{NO}_x$  и полноту окисления топлива. Комплексное исследование характеристик распыления и сжигания необходимо для определения оптимальных режимов, обеспечивающих снижение выбросов при сохранении энергетической эффективности.

## 1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Исследование совместного распыления несмешивающихся жидкостей (на примере дизельного топлива и воды) проведено при помощи пароэнергетической форсунки, используемой в низкоэмиссионном лабораторном образце горелочного устройства. Основной особенностью горелки является то, что в устройстве реализован способ сжигания путем распыла топлива струей перегретого водяного пара в камеру газогенерации. Ранее на базе реального водогрейного котла малой мощности было продемонстрировано, что такой подход позволяет обеспечить низкие показатели по вредным выбросам при сжигании как дизельного, так и низкокачественного топлива [22].

Изучение характеристик получаемого спрея было проведено на экспериментальной установке по исследованию распыла жидкости струей перегретого водяного пара [21]. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Основными элементами установки являются: пароэнергетическая форсунка (блок распыла лабораторного образца горелочного устройства), автоматизированная система подачи топлива и пара, измерительные приборы, вытяжная система.

Для исследования характеристик формируемого газочапельного потока использовался метод цифровой визуализации, основанный на использовании широко известного метода PIV. Поток освещается импульсным лазером (Nd:YAG лазер Quantel EVERGreen с длиной волны 532 нм), свет которого сфокусирован в виде лазерного ножа. Образы освещенных капель регистрируются цифровой ПЗС-камерой ImperX Bobcat 6620 для последующей компьютерной обработки. В исследуемые жидкости предвари-

тельно был подмешан люминесцентный краситель Nile Red: длина волны возбуждающего света соответствует длине волны лазера – 532 нм. При этом использовалось чистое дизельное топливо, а к воде добавлялось небольшое количество этилового спирта для лучшего растворения красителя. Длина волны переизлучаемого красителем света для дизельного топлива составляла 585 нм, для воды – 660 нм, что при использовании различных пороговых светофильтров позволило регистрировать жидкости по отдельности.

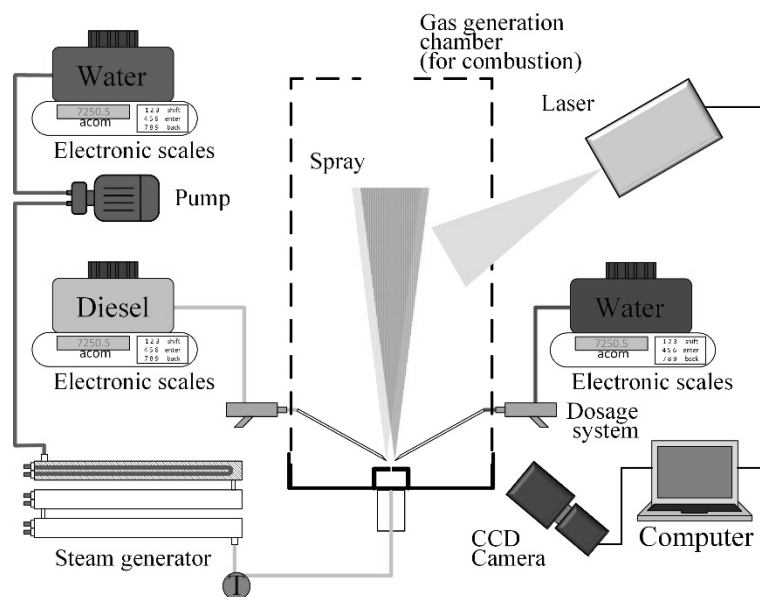


Рис. 1 – Схема экспериментального стенда по исследованию распыления несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара [21]

Fig. 1 – Scheme of an experimental setup for studying the spraying of immiscible liquids with a jet of superheated steam [21]

Помимо изучения характеристик распыла несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара было проведено исследование характеристик работы лабораторного образца горелочного устройства, в котором применяется данный подход подачи топлива с дополнительной подачей воды в парогенераторную форсунку. По аналогии с предыдущими работами авторов [23] была проведена серия измерений, которая включает измерение температуры факела и анализ продуктов сгорания как во внешнем пламени вдоль вертикальной оси симметрии горелочного устройства, так и на выходе из водоохлаждаемого участка сбора дымовых газов. Для измерения температуры использовалась платинородий-платинородиевая термопара типа Б. Для исследования состава продуктов сгорания использовались газоанализаторы ТЕСТ-1 и Testo 350 соответственно. Более подробно описание методики приведено в [23].

## 2. Результаты измерений и их анализ

На рис. 2 представлены характерные фотографии, полученные методом PIV при совместном распыле обеих жидкостей с расходом 0,6 кг/ч для каждой: а) теневая фотография; б) подсветка лазером без фильтров;

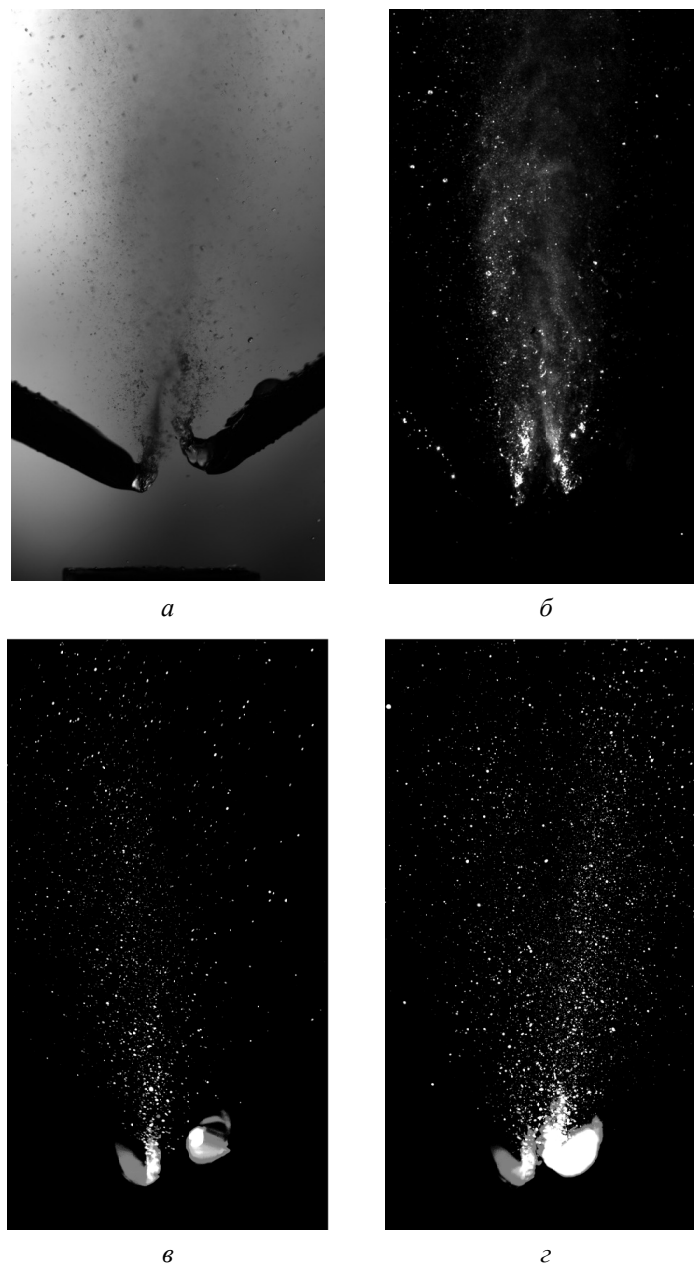


*Рис. 2* – Характерные фотографии газокapельного потока, формируемого при распылении несмешивающихся жидкостей вода/дизельное топливо высокоскоростной струей:

*a* – теневая фотография; *б* – подсветка лазером без фильтров; *в* – с фильтрами «оранжевое стекло» ( $> 550$  нм) и «сине-зеленое стекло» ( $< 590$  нм) – регистрируется только дизельное топливо; *г* – с фильтром «красное стекло» ( $> 610$  нм) – регистрируется только вода

*Fig. 2* – Characteristic photographs of a gas-droplet flow formed during atomization of immiscible liquids water/diesel fuel by a high-speed jet:

*a* – is a shadow photograph; *b* – is laser illumination without filters; *c* – is with “orange glass” ( $> 550$  nm) and “blue-green glass” ( $< 590$  nm) filters – only diesel fuel is registered; *d* – is with “red glass” ( $> 610$  nm) filter – only water is registered

в) с фильтрами «оранжевое стекло» ( $> 550$  нм) и «сине-зеленое стекло» ( $< 590$  нм) – регистрируется только дизельное топливо; г) с фильтром «красное стекло» ( $> 610$  нм) – регистрируется только вода. Для съемки с пороговыми фильтрами представлены результаты объединения десяти полученных фотографий для каждой жидкости. Следует отметить, что использование пороговых светофильтров не позволяло полностью исключить свечение от второй жидкости. Это было учтено при дальнейшей обработке.

На рис. 3 представлен дисперсный состав, вычисленный по результатам цифровой обработки изображения: а) дизельное топливо; б) вода. Для этого к полученным фотографиям применены следующие процедуры: бинаризация изображения для увеличения контрастности; нахождение границ (Laplace edge detection); определение диаметра сферических образов. Можно заметить, что для обеих жидкостей характерно эффективное распыление: наибольшее количество детектируемых капель лежит в диапазоне  $10 \dots 40$  мкм. Это говорит о применимости используемого метода распыла для задачи распыления несмешивающихся жидкостей без предварительного перемешивания (даже для соотношения  $1 : 1$ ), так как добавление дополнительной жидкости не нарушает условий для обеспечения эффективного дробления топлива паровой струей, показанной в [21].

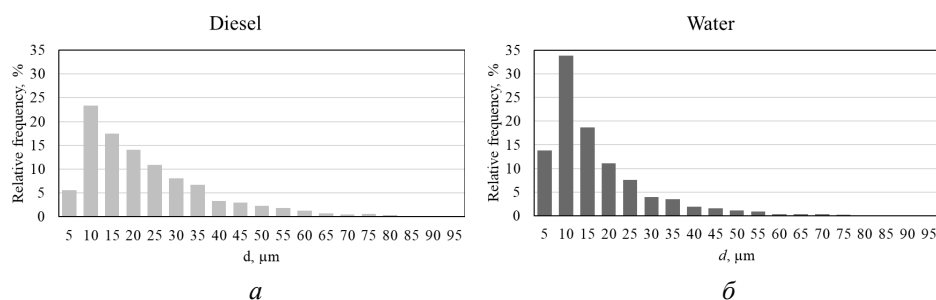


Рис. 3 – Дисперсный состав газокapельного потока, формируемого при распылении несмешивающихся жидкостей дизельное топливо / вода высокоскоростной струей

Fig. 3 – Dispersed composition of a gas-droplet flow formed by spraying immiscible liquids diesel fuel / water with a high-speed jet

Далее было проведено исследование характеристик сжигания дизельного топлива с добавлением воды при распыле. Для исследования были выбраны следующие режимы: расход пара для распыла  $0,8$  кг/ч, расход топлива  $1$  кг/ч, расход воды  $0$  кг/ч (далее – S8D10); расход пара  $0,8$  кг/ч, расход топлива  $1$  кг/ч, расход воды  $0,2$  кг/ч (далее – S8D10W2); расход пара  $0,8$  кг/ч, расход топлива  $1$  кг/ч, расход воды  $0,4$  кг/ч (далее – S8D10W4). На рис. 4 представлены зависимости температуры вдоль оси симметрии пламени для режимов горения дизельного топлива, распыляемого паровой струей, и дизельного топлива с совместной подачей воды.

По полученным результатам видно, что при добавлении в струю топлива потока воды с расходом  $0,2$  кг/ч заметно снижение температуры пламени по всей длине факела. Отличие максимальных значений температуры составляет  $300 \dots 400$  °C для различных режимов. При этом проявляется нестабильность горения, которая выражается в колебании температурных значений пламени и видна по характеру кривых и разбросу значений между экспериментами. Увеличение подачи воды с  $0,2$  до  $0,4$  кг/ч ведет

к дальнейшему снижению температур на 100...150 °С и росту пульсаций пламени.

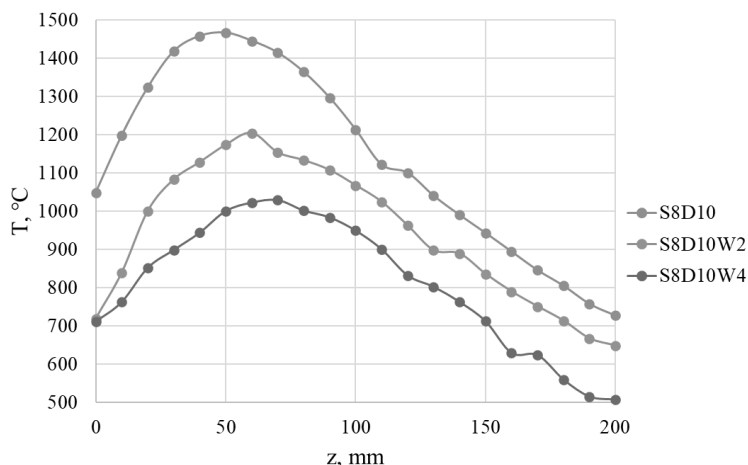


Рис. 4 – Температура вдоль оси симметрии пламени при сжигании водотопливного спрея

Fig. 4 – Temperature along the flame symmetry axis during combustion of water-fuel spray

Добавление воды при сжигании дизельного топлива ведет к изменению концентраций компонентов пламени (рис. 5). Из предположения, что эжекционный подсос воздуха через отверстия в корпусе горелочного устройства не меняется с добавлением воды, можно сделать вывод, что степень выгорания топлива внутри камеры газогенерации уменьшается, так как концентрация кислорода вдоль всей линии измерения газового состава увеличивается, а концентрация углекислого газа сокращается. Также заметно сокращение содержания монооксида углерода на выходе из сопла горелочного устройства от 3 % при сжигании только дизельного топлива до менее 2 % при сжигании дизельного топлива с добавлением воды (0,4 кг/ч).

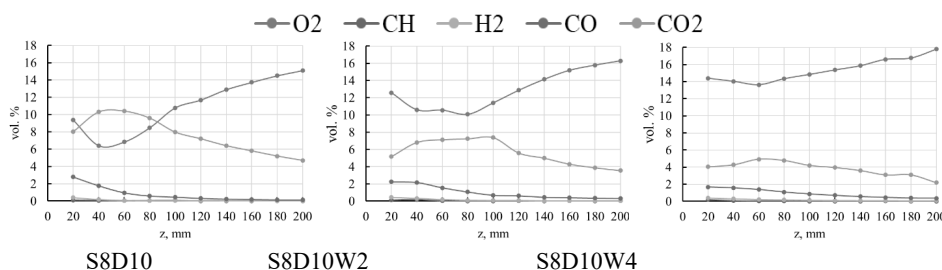


Рис. 5 – Объемное содержание веществ в пламени вдоль оси симметрии горелочного устройства

Fig. 5 – Volumetric content of substances in the flame along the axis of symmetry of the burner device

Далее был проведен анализ охлажденных продуктов сгорания на выходе из водоохлаждаемого участка сбора дымовых газов. Интегрально содержание вредных выбросов в дымовых газах в пересчете на удельные показатели в миллиграммах на киловатт-час [мг/кВт · ч] представлено на

рис. 6. Для расширения области анализа влияния добавления воды дополнительно к режимам 0,2 и 0,4 кг/ч были исследованы режимы с расходом 0,52 и 0,58 кг/ч (далее – S8D10 + W520 и S8D10 + W580 соответственно). Получено, что при добавлении 0,2 кг/ч воды происходит снижение на 30 % выбросов оксидов азота. При добавлении 0,4 кг/ч воды обеспечивается снижение на 50 % относительно режима с подачей только дизельного топлива. В аналогичной пропорции происходит рост выбросов CO. Дальнейшее увеличение расхода воды слабо влияет на выбросы оксидов азота, но ведет к значительному росту выбросов CO. Образование углеводородных соединений  $C_nH_m$  остается практически неизменным при расходе воды до 0,2 кг/ч, после чего демонстрирует многократный рост по мере увеличения расхода воды (рис. 6).

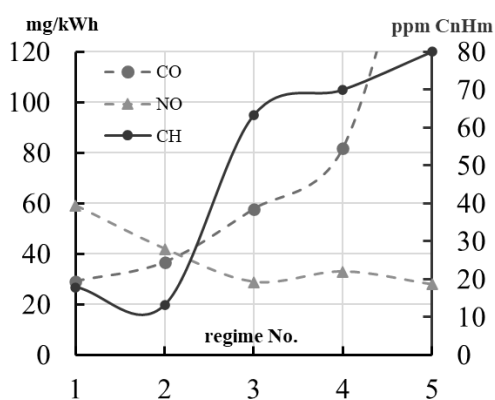


Рис. 6 – Результаты измерения интегрального содержания вредных выбросов в продуктах сгорания:

1 – S8D10; 2 – S8D10W2; 3 – S8D10W4;  
4 – S8D10 + W520; 5 – S8D10 + W580

Fig. 6. Results of measuring the integral content of harmful emissions in combustion products:

1 – S8D10; 2 – S8D10W2; 3 – S8D10W4;  
4 – S8D10 + W520; 5 – S8D10 + W580

### Заключение

Проведенные исследования совместного распыла несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара на примере дизельного топлива и воды показали, что данный метод позволяет реализовать эффективное распыление как воды, так и топлива в едином потоке. Полученные результаты на пароэнергетической форсунке с одновременной подачей воды в область взаимодействия «пар – топливо» продемонстрировали, что распыление струей перегретого пара обеспечивает качественное диспергирование с преобладающим размером капель 10...40 мкм обеих жидкостей, что позволяет использовать данный подход для задач распыла двух жидкостей без их предварительного смешивания.

На примере совместного распыления дизельного топлива и воды пароэнергетической форсункой в низкоэмиссионном горелочном устройстве показано, что такой подход сопоставим с использованием традиционных водотопливных эмульсий для задач снижения производства вредных

веществ в процессе горения. В то же время изученный способ исключает необходимость использования эмульгаторов, тем самым снижаются эксплуатационные затраты как на стабилизацию эмульсии, так и на риски коррозии оборудования. При этом способ совместного распыла паровой струей приводит к аналогичному результату, получаемому при сжигании водотопливных эмульсий, – к снижению температуры пламени. В настоящей работе достигнуто уменьшение максимальной средней температуры более чем на 300 °С, что способствует уменьшению образования оксидов азота по тепловому механизму. Оптимальное соотношение воды и топлива (0,2...0,4 кг/ч воды на 1 кг/ч топлива) обеспечивает снижение выбросов NO<sub>x</sub> на 30...50 %. Увеличение данного соотношения вызывает рост концентрации СО и углеводородов в продуктах сгорания, а также повышает нестабильность горения.

Для дальнейшего использования и практического внедрения метода требуется оптимизация режимов распыления и горения с целью минимизации негативных эффектов (рост СО, нестабильность пламени). Дополнительные исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров (температура пара, давление, конструкция горелки) на характеристики распыления и сгорания.

Таким образом, предложенный метод представляет собой многообещающее решение для повышения экологичности сжигания жидкого топлива, однако требует дальнейшей доработки для обеспечения стабильности и эффективности процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Alternative liquid fuels: achievements and prospects / P.A. Strizhak, S.M. Aldoshin, D.O. Glushkov, K.I. Dement'ev, E.N. Ivashkina, M.V. Kulikova, A.L. Maximov, G.Yu. Nazarova, A.S. Noskov, V.N. Parmon, K.K. Paushkina, E.V. Popok, A.S. Sviridenko, L.S. Yanovsky // *Russian Chemical Reviews*. – 2025. – Vol. 94. – P. RCR5162. – DOI: 10.59761/RCR5162.
2. **Lowy D.A., Melendez J.R., Mátyás B.** Electroreduction of carbon dioxide to liquid fuels: A low-cost, sustainable technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 194. – P. 114300. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114300.
3. Investigation of gasoline partially premixed combustion with external exhaust gas recirculation / V. Ravaglioli, F. Ponti, G. Silvagni, D. Moro, F. Stola, M. De Cesare // *SAE International Journal of Engines*. – 2021. – Vol. 15 (5). – P. 613–629. – DOI: 10.4271/03-15-05-0033.
4. Combustion, performance and emission discussion of soapberry seed oil methyl ester blends and exhaust gas recirculation in common rail direct fuel injection system / M.O.A. Sajjad, T. Sathish, R. Saravanan, M. Asif, E. Linul, Ü. Ağbulut // *Energy*. – 2023. – Vol. 278. – P. 127763. – DOI: 10.1016/j.energy.2023.127763.
5. **Abrar I., Bhaskarwar A.N.** Effect of alcohols on water solubilization in surfactant-free diesel microemulsions // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 504–512. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.10.157.
6. Micro-explosion combustion characteristics of boron/ammonium perchlorate/polyvinylidene fluoride composite microspheres / D. Liang, Y. Jiang, J. Wang, S. Wang, J. Wang, W. Xu, D. Shen // *Powder Technology*. – 2025. – Vol. 465. – P. 121354. – DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121354.
7. Features of combustion of water-fuel emulsions with different methods of introducing water into the combustion zone / O. Kolbasenko, S. Anastasenko, B. Dymo, O. Shostak // *Problems of Regional Energetics*. – 2025. – Vol. 2. – P. 178–189. – DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.15.

8. The influence of nitrous oxide on ignition and flame propagation of RP-3 kerosene / S. Li, X. Wei, D. Yao, N. Zhang, Y. Dong, Y. Xie, X. Zhao, S. Xi, K. Wang, Q.-D. Wang, J. Liang // *Combustion and Flame*. – 2025. – Vol. 273. – P. 113951. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113951.
9. Aluminium – water hydrogen generator for domestic and mobile application / A.Z. Zhuk, E.I. Shkolnikov, T.I. Borodina, G.E. Valiano, A.V. Dolzhenko, E.A. Kiseleva, S.A. Kochanova, E.D. Filippov, V.A. Semenova // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 334. – P. 120693. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693.
10. Tuning sulfur vacancies in CoS<sub>2</sub> via a molten salt approach for promoted mercury vapor adsorption / D. Liu, L. Yang, J. Wu, B. Li // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 450. – P. 137956. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.137956.
11. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review / J. Tian, L. Wang, Y. Xiong, Y. Wang, W. Yin, G. Tian, Z. Wang, Y. Cheng, S. Ji // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 183. – P. 514–543. – DOI: 10.1016/j.psep.2024.01.020.
12. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions / M.A. Ismael, M.R. Heikal, A.R.A. Aziz, F. Syah, E.Z. Zainal A., C. Crua // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 222. – P. 762–771. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.070.
13. **Gopidesi R.K., Selvi Rajaram P.** A review on emulsified fuels and their application in diesel engine // *International Journal of Ambient Energy*. – 2022. – Vol. 43 (1). – P. 732–740. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435.
14. **Woo S., Lee K.** Effect of injection strategy and water content on water emulsion fuel engine // *Fuel*. – 2023. – Vol. 343. – P. 127809. – DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127809.
15. **Gowrishankar S., Krishnasamy A.** Injection system modification for biodiesel-water emulsion engine // *Fuel*. – 2023. – Vol. 337. – P. 127222. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127222.
16. **Ayhan V., Ece Y.M.** Electronically controlled direct water injection to reduce NOx emissions // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 260. – P. 114328. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114328.
17. Emulsifier-free biodiesel-water-ethanol emulsion fuel / M.A. Abdul Rashid, A.M. Ithnin, W.J. Yahya, W.N.I. Wan Mahdi, N.A. Mazlan, A.A. Zulmajdi, D.A. Sengeng, K. Eiji // *Fuel*. – 2025. – Vol. 392. – P. 134873. – DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134873.
18. **Shlegel N., Klimenko A., Strizhak P.** Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets // *Fuel*. – 2024. – Vol. 372. – P. 132218. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132218.
19. **Vigneswaran R., Balasubramanian D., Sastha B.D.S.** Combustion characteristics of diesel engine with (TiO<sub>2</sub>) and water-in-diesel emulsion fuel // *Fuel*. – 2021. – Vol. 285. – P. 119115. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119115.
20. Experimental study of inductive electrostatic dual-fluid nozzle for dust pollution control / H. Han, H. Wang, Q. Zhang, T. Yang, X. Li, C. Zhang, N. Terbish // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 434. – P. 119343. – DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119343.
21. 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. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
22. Combustion of liquid hydrocarbon fuels sprayed into gas generation chamber with superheated steam as low emission technology for energy production / E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, E.Yu. Shadrin, M.A. Mukhina, V.A. Kuznetsov, A.V. Minakov // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381. – P. 133344. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133344.
23. Experimental study of kerosene combustion characteristics in a jet of superheated steam with a controlled air excess / M.A. Mukhina, I.S. Sadkin, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopye // *Engineered Science*. – 2024. – Vol. 31. – P. 1195. – DOI: 10.30919/es1195.

## CO-ATOMIZATION OF IMMISCIBLE LIQUIDS BY A JET OF SUPERHEATED STEAM AND ITS EFFECT ON COMBUSTION CHARACTERISTICS

**Butakov E.B., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu.**

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

The article presents the results of an experimental study of the co-atomization of immiscible liquids (diesel fuel/water) with a superheated steam jet and their subsequent combustion in a low-emission burner with a gas generation chamber. It is shown that a steam-powered nozzle ensures efficient dispersion of both phases without preliminary emulsification: the predominant droplet size is 10–40  $\mu\text{m}$ . With the addition of water in an amount of 0.2–0.4 kg/h to 1 kg/h of fuel, a decrease in the maximum flame temperature by 300–400  $^{\circ}\text{C}$  and a reduction in  $\text{NO}_x$  emissions by 30–50 % are achieved. With a further increase in the proportion of water, an increase in the concentrations of CO and  $\text{C}_n\text{H}_m$ , as well as increased flame pulsations, are observed. The obtained results confirm the efficiency of the separate atomization method without emulsifiers and determine the range of optimal combustion modes.

**Keywords:** atomization, superheated steam, immiscible liquids, water-fuel systems,  $\text{NO}_x$ , low-emission combustion.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37

### REFERENCES

1. Strizhak P.A., Aldoshin S.M., Glushkov D.O., Dement'ev K.I., Ivashkina E.N., Kulikova M.V., Maximov A.L., Nazarova G.Yu., Noskov A.S., Parmon V.N., Paushkina K.K., Popok E.V., Sviridenko A.S., Yanovsky L.S. Alternative liquid fuels: achievements and prospects. *Russian Chemical Reviews*, 2025, vol. 94, p. RCR5162. DOI: 10.59761/RCR5162.
2. Lowy D.A., Melendez J.R., Mátyás B. Electroreduction of carbon dioxide to liquid fuels: A low-cost, sustainable technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 194, p. 114300. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114300.
3. Ravaglioli V., Ponti F., Silvagni G., Moro D., Stola F., De Cesare M. Investigation of gasoline partially premixed combustion with external exhaust gas recirculation. *SAE International Journal of Engines*, 2021, vol. 15 (5), pp. 613–629. DOI: 10.4271/03-15-05-0033.
4. Sajjad M.O.A., Sathish T., Saravanan R., Asif M., Linul E., Ağbulut Ü. Combustion, performance and emission discussion of soapberry seed oil methyl ester blends and exhaust gas recirculation in common rail direct fuel injection system. *Energy*, 2023, vol. 278, p. 127763. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127763.
5. Abrar I., Bhaskarwar A.N. Effect of alcohols on water solubilization in surfactant-free diesel microemulsions. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 504–512. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.157.
6. Liang D., Jiang Y., Wang J., Wang S., Wang J., Xu W., Shen D. Micro-explosion combustion characteristics of boron/ammonium perchlorate/polyvinylidene fluoride composite microspheres. *Powder Technology*, 2025, vol. 465, p. 121354. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121354.
7. Kolbasenko O., Anastasenko S., Dymo B., Shostak O. Features of combustion of water-fuel emulsions with different methods of introducing water into the combustion zone. *Problems of Regional Energetics*, 2025, vol. 2, pp. 178–189. DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.15.
8. Li S., Wei X., Yao D., Zhang N., Dong Y., Xie Y., Zhao X., Xi S., Wang K., Wang Q.-D., Liang J. The influence of nitrous oxide on ignition and flame propagation of RP-3 kerosene. *Combustion and Flame*, 2025, vol. 273, p. 113951. DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113951.
9. Zhuk A.Z., Shkolnikov E.I., Borodina T.I., Valiano G.E., Dolzhenko A.V., Kiseleva E.A., Kochanova S.A., Filippov E.D., Semenova V.A. Aluminium – water hydrogen generator for domestic and mobile application. *Applied Energy*, 2023, vol. 334, p. 120693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693.

10. Liu D., Yang L., Wu J., Li B. Tuning sulfur vacancies in CoS<sub>2</sub> via a molten salt approach for promoted mercury vapor adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 450, p. 137956. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137956.
11. Tian J., Wang L., Xiong Y., Wang Y., Yin W., Tian G., Wang Z., Cheng Y., Ji S. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, vol. 183, pp. 514–543. DOI: 10.1016/j.psep.2024.01.020.
12. Ismael M.A., Heikal M.R., Aziz A.R.A., Syah F., Zainal A. E.Z., Crua C. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions. *Applied Energy*, 2018, vol. 222, pp. 762–771. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.070.
13. Gopidesi R.K., Selvi Rajaram P. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 2022, vol. 43 (1), pp. 732–740. DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435.
14. Woo S., Lee K. Effect of injection strategy and water content on water emulsion fuel engine. *Fuel*, 2023, vol. 343, p. 127809. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127809.
15. Gowrishankar S., Krishnasamy A. Injection system modification for biodiesel-water emulsion engine. *Fuel*, 2023, vol. 337, p. 127222. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127222.
16. Ayhan V., Ece Y.M. Electronically controlled direct water injection to reduce NOx emissions. *Applied Energy*, 2020, vol. 260, p. 114328. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114328.
17. Abdul Rashid M.A., Ithnin A.M., Yahya W.J., Wan Mahdi W.N.I., Mazlan N.A., Zulmajdi A.A., Sugeng D.A., Eiji K. Emulsifier-free biodiesel-water-ethanol emulsion fuel. *Fuel*, 2025, vol. 392, p. 134873. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134873.
18. Shlegel N., Klimenko A., Strizhak P. Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets. *Fuel*, 2024, vol. 372, p. 132218. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132218.
19. Vigneswaran R., Balasubramanian D., Sastha B.D.S. Combustion characteristics of diesel engine with (TiO<sub>2</sub>) and water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, 2021, vol. 285, p. 119115. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119115.
20. Han H., Wang H., Zhang Q., Yang T., Li X., Zhang C., Terbish N. Experimental study of inductive electrostatic dual-fluid nozzle for dust pollution control. *Powder Technology*, 2024, vol. 434, p. 119343. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119343.
21. 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. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
22. Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Mukhina M.A., Kuznetsov V.A., Minaikov A.V. Combustion of liquid hydrocarbon fuels sprayed into gas generation chamber with superheated steam as low emission technology for energy production. *Fuel*, 2025, vol. 381, p. 133344. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133344.
23. Mukhina M.A., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P. Experimental study of kerosene combustion characteristics in a jet of superheated steam with a controlled air excess. *Engineered Science*, 2024, vol. 31, p. 1195. DOI: 10.30919/es1195.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Бутаков Евгений Борисович** – родился в 1990 году, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 89 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: e\_butakov@mail.ru).

**Butakov Evgeny** – Candidate of Sciences (Eng.), senior researcher at the Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 89 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: e\_butakov@mail.ru).



**Копьев Евгений Павлович** – родился в 1991 году, канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 120 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

**Kopyev Evgeny** – Candidate of Sciences (Eng.), Head of the 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 120 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).



**Садкин Иван Сергеевич** – родился в 1998 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 107 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

**Sadkin Ivan** – PhD student in NSTU, engineer researcher at the 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 107 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).



**Шадрин Евгений Юрьевич** – родился в 1992 году, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 108 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: evgen\_zavita@mail.ru).

**Shadrin Evgeny** – Candidate of Sciences (Phys & Math.), Senior Researcher at the 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 108 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen\_zavita@mail.ru).

Статья поступила 28 января 2026 г.  
Received January 28, 2026

---

#### To Reference:

Butakov E.B., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu. Sovmestnyi raspyl nesmeshivayushchikhsya zhidkostei struei peregretoego vodyanogo para i ego vliyanie na kharakteristiki szhiganiya [Co-atomization of immiscible liquids by a jet of superheated steam and its effect on combustion characteristics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 26–37. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37.

УДК 621.313.282

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА СЕЙСМОИСТОЧНИКА

**В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман***Новосибирский государственный технический университет*

Актуальность исследования обусловлена перспективностью практического использования электромагнитных сейсмоисточников в малоглубинной сейсморазведке, а также необходимостью совершенствования методов их динамического расчета. Объектом исследования является регулируемый электромагнитный привод сейсмоисточника с упругим реверсом бойка. Основной задачей исследований является создание более точной математической модели электромагнитного привода сейсмоисточника. На основе уравнения электрического состояния системы и уравнений Лагранжа 2-го рода разработана уточненная математическая модель динамики электромагнитного привода в виде системы дифференциальных уравнений, учитывающих взаимодействие инерционных масс, связанных упругими связями. Модель учитывает нелинейные свойства применяемых конструкционных материалов, потоки рассеяния и различного рода потери энергии в электромеханической системе. Использование модели позволяет проанализировать динамическое состояние электромагнитного сейсмоисточника в широком диапазоне изменения входных параметров и повысить качество проектирования. Результаты выполненных исследований могут представлять определенный интерес для специалистов в области расчета и проектирования силовых электромагнитных импульсных систем ударного действия.

*Ключевые слова:* сейсморазведка, электромагнитный сейсмоисточник, электромагнитный привод ударного действия, математическая модель, уравнения Лагранжа 2-го рода, численный метод, методы структурного моделирования, магнитное поле, электромеханические процессы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53

### Введение

При решении задач поисково-разведочных работ в инженерной геологии ведущее место занимает сейсмический метод с использованием малогабаритных невзрывных наземных сейсмоисточников [1, 2]. Данный метод основан на генерации упругих волн с помощью импульсных механических воздействий на поверхность грунта с помощью излучающей плиты [3].

Одним из перспективных решений для реализации малоглубинной сейсморазведки является применение импульсных сейсмоисточников, созданных на основе электромагнитных приводов с энергией механических воздействий до 1000 Дж [4–6]. Это обеспечивает сокращение сроков подготовки выполняемых полевых работ, их безопасность, минимальное воздействие на окружающую среду и экономическую эффективность [7].

Электромагнитный привод таких источников имеет достаточно высокий (до 40 %) КПД передачи энергии ударом и высокую идентичность сигналов при повторных воздействиях в процессе их накопления [8].

Основой многих силовых импульсных систем являются конструкции однокатушечных электромагнитных приводов с упругим реверсом ударной массы бойка [10, 11]. Подобные конструкции электроприводов просты в изготовлении, обладают высокой надежностью, а использование их в составе переносных или передвижных комплексов расширяет границы сейсмического метода [12, 13].

Следует отметить, что существующие модели, описывающие динамическое состояние электромагнитного ударного привода с упругим реверсом бойка, широко известны. Однако недостатками их описания является то, что движение взаимодействующих между собой инерционных масс и деформируемой среды характеризуется одной степенью свободы [14–16].

Всё это в разной степени оказывает влияние на точность динамических расчетов, так как в импульсе силы, генерируемой источником и передаваемой в деформируемую среду при ударе, не учитываются потери энергии в упругих связях механической системы и трение скольжения поступательно движущихся инерционных масс [17, 18].

Целью работы является создание более точной математической модели электромагнитного привода сейсмоисточника, учитывающей взаимодействие инерционных масс с упругими связями и потери энергии в электро-механической системе.

Особое внимание при создании модели следует обратить на точность воспроизведения основных нелинейностей электромеханической системы электропривода и потери энергии. Вызвано это тем, что точный анализ динамических процессов в таких системах во многом зависит от точности учтенных нелинейностей, а также различной природы потерь энергии, хотя и представляет значительные трудности в плане реализации процесса расчета созданных моделей.

## 1. Описание объекта исследований

Общая схема построения однокатушечного электромагнитного привода представлена на рис. 1. Основными элементами конструкции электропривода являются порождающие силовое взаимодействие ферромагнитный массивный боек 1 и статорная часть, включающая магнитопровод 2 с установленными с ним на одной оси верхним 3 и нижним 4 полюсами, выполненными в виде колец. Внутренняя полость магнитопровода занята катушкой возбуждения 5. Верхняя часть бойка через опорную проточку жестко связана с пружиной растяжения/сжатия 6. Другой конец пружины закреплен на неподвижном полюсе. Передача механической энергии в грунт осуществляется посредством штока 7, опирающегося на излучающую плиту 8.

При протекании тока по катушке возникает магнитное поле, взаимодействующее посредством электромагнитной силы с ферромагнитным бойком. Боек под действием этой силы ускоренно перемещается в направлении штока и наносит по нему удар.

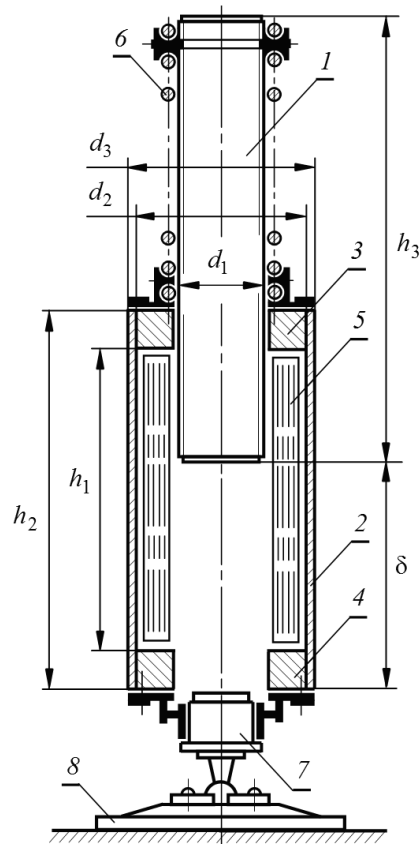


Рис. 1 – Импульсный электромагнитный сейсмоисточник

Fig. 1 – Pulse electromagnetic seismic source

В период бестоковой паузы боек под действием упругих сил пружины растяжения/сжатия стремится вернуться в исходное положение, соответствующее статическому равновесию механической системы. В результате поступательного движения боек периодически взаимодействует с торцевой поверхностью штока и генерирует импульс силы, передаваемый через излучающую плиту в грунт, совершая работу.

Управление электроприводом сейсмоисточника выполняется по положению бойка, что позволяет регулировать силу удара. Работа электропривода при заданной частоте и силе удара может осуществляться в автоколебательном режиме.

Система управления содержит датчики положения бойка, сигналы с которых подаются на блок формирования импульсов напряжения, питающих катушку возбуждения.

Электрическая подсистема электропривода получает питание от сети переменного тока либо питается автономно и представляет собой источник постоянного регулируемого напряжения.

Использование единственной катушки для управления движением ударной массы бойка с упругим реверсом и представленная компоновка конструкции электропривода больше всего отвечают требованиям минимизации габаритов сейсмоисточника

## 2. Математическая модель объекта

Создание математической модели сейсмоисточника связано с описанием электромеханических процессов с помощью уравнений электрического состояния и механического равновесия системы [19].

При описании процессов в электромеханической системе приняты следующие допущения:

- магнитная система электропривода представляет осесимметричную конструкцию, поэтому считаем, что силы одностороннего притяжения бойка здесь отсутствуют;
- потерями энергии на деформацию и нагрев при ударе пренебрегаем ввиду их малости в сравнении с кинетической энергией бойка;
- пренебрегаем присоединенной массой грунта и принимаем, что параметры модели грунта зависят только от свойств введенных упруго-вязких связей.

Динамическая расчетная модель механической колебательной системы сейсмоисточника представлена на рис. 2.

В расчетной модели (рис. 2) используются следующие обозначения:  $m_1$  – масса бойка;  $m_2$  – масса статорной части привода сейсмоисточника с катушкой возбуждения и элементами магнитопровода с полюсами;  $m_3$  – общая масса штока и излучающей плиты;  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  – координаты перемещений масс;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  – жесткости в опорах взаимодействующих масс;  $b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  – линейные коэффициенты вязких потерь;  $f_{эм}$  – сила электромагнитного взаимодействия в рабочем воздушном зазоре;  $f_{тр12}$ ,  $f_{тр32}$  – силы сопротивления движению (кулоновское трение);  $N_1$ ,  $N_2$  – средняя величина импульсов сил в конце удара.

Связь электрической, магнитной и механической систем сейсмоисточника осуществляется через общее уравнение баланса напряжений электромеханической системы.

Исходя из уравнения электрического баланса напряжений электромеханической системы [20], учитывая необратимые потери энергии, запишем:

$$U_q - i r_s = i r + \frac{d\psi(i_\mu, \delta)}{dt}, \quad (1)$$

где  $U_q$  – напряжение сети;  $r_s$  – сопротивление токоподводящих цепей;  $r$  – активное сопротивление, зависящее от объема, занимаемого катушкой, и применяемых проводниковых материалов;  $\psi = f(i_\mu, \delta)$  – потокосцепление;  $i$ ,  $i_\mu$  – общий ток в цепи питания и составляющая намагничивающего тока, идущая на создание магнитного поля, соответственно;  $\delta$  – переменная величина рабочего воздушного зазора, зависящая от положения бойка.

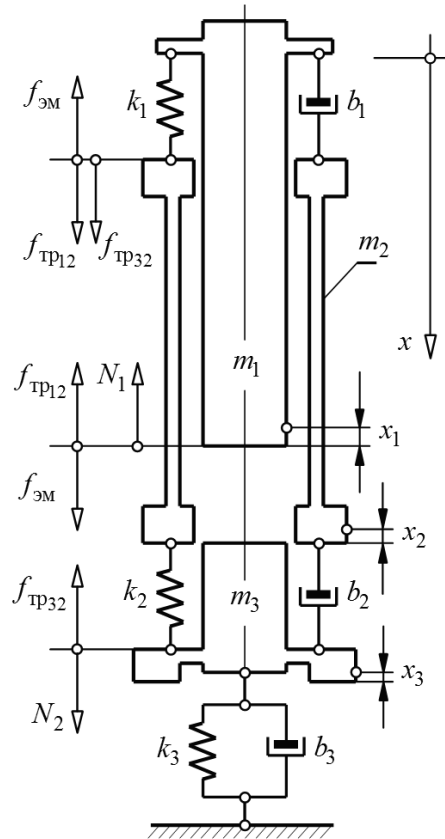


Рис. 2 – Динамическая расчетная модель колебательной системы сейсмоисточника

Fig. 2 – Dynamic calculation model of the oscillatory system of a seismic source

Уравнение (1) позволяет учесть дополнительные потери мощности от вихревых токов в стальных элементах конструкции привода, а также нелинейность характеристик применяемых конструкционных марок сталей.

Общий ток в цепи питания катушки определяется суммой тока потерь  $i_{\Pi}$  на вихревые токи и тока намагничивания  $i_{\mu}$  [21]:

$$i = i_{\Pi} + i_{\mu}.$$

Величина переменного воздушного рабочего зазора обусловлена механическим движением бойка и определяется через обобщенные координаты положений поступательно движущихся относительно друг друга масс (рис. 2):

$$\delta(t) = \delta_0 - x_1(t) + x_2(t),$$

где  $\delta_0$  – начальный воздушный зазор при обесточенной катушке, обеспечивающий режим работы привода сейсмоисточника.

Начальное положение бойка соответствует его положению при обесточенной катушке возбуждения (см. рис. 1).

Выберем равновесие масс за начало отсчета (см. рис. 2). Согласно установленным связям система имеет три степени свободы.

Очевидно, что запас кинетической энергии определяется только линейными отклонениями поступательно движущихся масс от положения их равновесия при обесточенной катушке. Для учета данных отклонений принимаем независимые переменные величины  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  в качестве обобщенных координат динамической системы.

Движение системы с учетом установленных обобщенных координат может быть получено с помощью уравнений Лагранжа [22, 23]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_j} - \frac{\partial T}{\partial x_j} = Q_j^{\Pi} + Q_j^{\Phi} + Q_j^B, \quad (2)$$

где  $T$  – кинетическая энергия находящихся в движении масс;  $Q_j^{\Pi}$ ,  $Q_j^{\Phi}$ ,  $Q_j^B$  – обобщенные силы;  $j = 3$  – число степеней свободы.

Входящие в уравнение (2) обобщенные силы  $Q_k^{\Pi}$ ,  $Q_k^{\Phi}$  и  $Q_k^B$  соответствуют потенциальной энергии, энергиям рассеяния и энергиям внешних воздействий. Силы  $Q_j^{\Pi}$  характеризуют жесткость опор в направлениях координат  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  (см. рис. 2). Силы  $Q_j^{\Phi}$  отражают их диссипативные свойства. Аналогичным образом силы  $Q_j^B$  в общем случае зависят от периодической возмущающей силы, которая является заданной функцией времени и сил трения.

Для формирования уравнений динамического состояния трехмассовой системы путем подстановки в уравнение (1) предварительно находим выражения для кинетической и потенциальной энергии, полных производных по времени и частных производных.

Выражение кинетической энергии системы складывается из трех слагаемых в виде

$$T = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m=3} m_j \dot{x}_j^2 = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{2} + \frac{m_2 \dot{x}_2^2}{2} + \frac{m_3 \dot{x}_3^2}{2}.$$

Обобщенные силы, характеризующие жесткость опор, представим в виде

$$Q_j^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \sum_{j=1}^{m=3} \frac{1}{2} [k_1(x_1 - x_2)^2 + k_2(x_2 - x_3)^2 + k_3 x_3^2],$$

отсюда все три проекции по обобщенным координатам:

$$Q_1^{\Pi} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = -k_1(x_1 - x_2); \quad (3)$$

$$Q_2^\Pi = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = k_1(x_1 - x_2) - k_2(x_2 - x_3); \quad (4)$$

$$Q_3^\Pi = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} = k_2(x_2 - x_3) - k_3x_3, \quad (5)$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия системы, определяемая жесткостью связей взаимодействующих масс.

Обобщенные силы, отражающие диссипативные свойства опор и их проекции по обобщенным координатам:

$$Q_j^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_j} = -\frac{\partial}{\partial \dot{x}_j} \sum_{j=1}^{m=3} \frac{1}{2} \left[ b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2 + b_3\dot{x}_3^2 \right];$$

$$Q_1^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_1} = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \quad (6)$$

$$Q_2^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_2} = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (7)$$

$$Q_3^\Phi = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_3} = b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - b_3\dot{x}_3, \quad (8)$$

где  $\Phi$  – диссипативная функция (функция Рэлея).

Следует отметить, что данные производные характеризуют силы, связанные с необратимыми потерями энергии на вязкое трение.

Полные производные по времени от частных производных по кинетической энергии:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2}; \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2}; \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2}. \quad (11)$$

Все частные производные от кинетической энергии по обобщенным координатам равны нулю  $\frac{\partial T}{\partial x_j} = 0$ .

Проекция обобщенных сил, вызванных только возмущающей периодической силой и силами сухого трения:

$$Q_{x_1}^B = f_{\text{эм}}(i_\mu, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2); \quad (12)$$

$$Q_{x_2}^B = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (13)$$

$$Q_{x_3}^B = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3), \quad (14)$$

где  $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$  – возмущающая электромагнитная сила, зависящая от тока и положения бойка.

Электромагнитная сила  $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$  в общем случае является функцией времени и зависит от тока намагничивания и положения бойка.

Энергия, передаваемая в деформируемую среду посредством излучающей плиты, и энергия, возвращаемая в систему при отскоке бойка в результате их взаимодействия, в конечном счете будет зависеть от начальной скорости излучающей плиты и начальной скорости бойка по окончании удара. Результаты этого энергообмена можно выразить через среднюю величину импульсов сил в конце удара:

$$N_1 = \frac{m_1 \bar{v}_1}{\tau_{\text{и}}}; \quad N_2 = \frac{m_3 \bar{v}_3}{\tau_{\text{и}}}, \quad (15)$$

где  $\bar{v}_3$  – скорость излучающей плиты по окончании удара;  $\bar{v}_1$  – скорость бойка по окончании удара (скорость при отскоке);  $\tau_{\text{и}}$  – время действия ударного импульса.

С учетом ударных взаимодействий [формула (15)] для проекций обобщенных сил [формулы (12)–(14)] получим:

$$Q_{x_1}^B = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - N_1; \quad (16)$$

$$Q_{x_2}^B = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (17)$$

$$Q_{x_3}^B = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + N_2. \quad (18)$$

Принимая во внимание выражения (1)–(18), систему связанных дифференциальных уравнений второго порядка, полученных на основе уравнений Лагранжа 2-го рода, представим в окончательном виде:

$$U_q - i r_s = i r + \frac{d\psi(i_{\mu}, \delta)}{dt}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + b_1 (d\dot{x}_1 - d\dot{x}_2) + k_1 (x_1 - x_2) = \\ = f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) - f_{\text{тр}12} \text{sign}(d\dot{x}_1 - d\dot{x}_2) - N_1; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
& m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} - b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - \\
& - k_1(x_1 - x_2) + k_2(x_2 - x_3) = -f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta) + \\
& + f_{\text{тр}12} \text{sign}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3); \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} - b_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + b_3 \dot{x}_3 - k_2(x_2 - x_3) + \\
& + k_3 x_3 = -f_{\text{тр}32} \text{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + N_2. \quad (22)
\end{aligned}$$

Решение данной системы возможно с использованием численных методов.

Полезную энергию  $T_2$ , передаваемую при нанесении удара, и энергию при отскоке бойка  $T_3$  можно выразить как

$$T_2 = T_1 (1 - k_{\text{от}}^2); \quad T_3 = T_1 k_{\text{от}}^2, \quad (23)$$

где  $T_1 = m v_1^2 / 2$  – энергия при ударе бойка;  $k_{\text{от}} = \bar{v}_1 / v_1$  – коэффициент, отражающий отскок бойка после нанесения удара и характеризующий энергию, возвращаемую в механическую систему, и энергию, передаваемую в деформируемую среду;  $v_1$  – скорость бойка перед ударом;  $\bar{v}_1$  – начальная скорость бойка при отскоке.

Уравнения (19)–(23) составляют математическую модель электромагнитного сейсмоисточника. Решение нелинейных уравнений возможно с использованием численных методов.

Важным этапом такого расчета является получение нелинейных свойств модели с заданной геометрией магнитной цепи в виде зависимостей потокосцеплений  $\psi(i_{\mu}, \delta)$  и электромагнитных усилий  $f_{\text{эм}}(i_{\mu}, \delta)$  в функции тока и величины воздушного рабочего зазора. Точные их значения могут быть получены с помощью решения полевой задачи с использованием стандартных программ конечно-элементного моделирования магнитного поля [24–27]. Полученные на определенном шаге массивы статических параметров потокосцеплений и электромагнитных усилий могут использоваться при динамических расчетах в виде опорных точек для учета нелинейных свойств модели [28].

При наличии массива нелинейных статических параметров для дальнейшей реализации модели удобно воспользоваться методами структурного моделирования. В основе таких методов используется блочное имитационное моделирование с применением современной технологии визуального ориентированного программирования, основанного на применении численных методов [29, 30]. С методикой подобного моделирования можно более подробно ознакомиться в [31].

### Заключение

Разработана уточненная математическая модель динамики электромагнитного ударного привода сейсмоисточника в виде связанных дифференциальных уравнений электрического состояния системы и механического равновесия многомассовой механической системы, полученных на основе уравнений Лагранжа 2-го рода, учитывающих взаимодействие инерционных масс и потери энергии в упругих связях.

Целенаправленное усложнение модели за счет увеличения степени свободы механической системы оправдывается повышением точности воспроизведения динамических характеристик при проведении расчетов и применяется с целью более точного определения рациональных параметров электропривода в задачах проектирования.

Для обеспечения более широких возможностей динамического расчета и качественного решения вопросов, связанных с анализом и синтезом созданной модели, рекомендуется воспользоваться средствами структурного моделирования с применением современных технологий визуально ориентированного программирования, основанного на применении численных методов.

Результаты работы могут представлять определенный интерес для специалистов в области расчета и проектирования силовых электромагнитных импульсных систем ударного действия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / под ред. М.Б. Шнеерсона. – М.: Недра, 1998. – 527 с.
2. **Шнеерсон М.Б.** Основные направления развития технологии полевых работ наземной сейсморазведки // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 1 (74). – С. 16–19. – DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10065.
3. **Bakulin A., Silvestrov I., Pevzner R.** Surface seismics with DAS: An emerging alternative to modern point-sensor acquisition // The Leading Edge. – 2020. – Vol. 39 (11). – P. 808–818. – DOI: 10.1190/tle39110808.1.
4. **Ивашин В.В., Певчев В.П.** К вопросу развития импульсных наземных сейсмоисточников для сейсморазведки // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 313–321.
5. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50–53.
6. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 8. – С. 29–31.
7. Принципы повышения эффективности импульсных электромагнитных сейсмоисточников малой мощности для исследования малых глубин / В.А. Селезнев, В.А. Живодров, Г.Г. Угаров, К.М. Усанов // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2003. – № 1 (03). – С. 28–29.
8. **Певчев В.П.** Анализ влияния форсировки короткоходового импульсного электромагнитного двигателя сейсмоисточника на КПД // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – № 6. – С. 77–78.

9. **Нейман В.Ю.** К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы / под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
10. Электромагнитный импульсный сейсмоисточник малой мощности / Н.А. Бритков, А.П. Малахов, Н.П. Ряшенцев, А.П. Копейкин, Г.Г. Щерба // Электромагнитные импульсные системы. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1982. – С. 160–166.
11. **Угаров Г.Г., Усанов К.М., Нейман В.Ю.** Рабочий цикл электромагнитной ударной машины с аккумулярованием магнитной энергии в период холостого хода // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1997. – № 3. – С. 76–80.
12. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground / K.M. Usanov, A.V. Volgin, E.A. Chetverikov, V.A. Kargin, A.P. Moiseev, Z.I. Ivanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – P. 032050. – DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.
13. **Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А.** Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия // Автоматизированные электромеханические системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
14. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87. – DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
15. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
16. **Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В.** Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
17. Имитационное моделирование рабочего процесса электромагнитного привода скважинного виброисточника / Б.Ф. Симонов, В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.О. Кордубайло // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 120–130. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.
18. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия со свободным выбегом бойка // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – № 5. – С. 32–40. – DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.032-040.
19. **Манжосов В.К., Лукутина Н.О., Невенчанная Т.О.** Динамика и синтез электромагнитных генераторов силовых импульсов. – Фрунзе: Илим, 1985. – 119 с.
20. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Расчет динамики электромагнитного привода колебательного движения с однополупериодным выпрямителем // Вестник МЭИ. – 2016. – № 6. – С. 64–71.
21. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78. – DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
22. **Добронравов В.В., Никитин Н.Н.** Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.

23. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель электромеханической системы колебательного движения с упругими связями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 35–40. – DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.035-040.
24. **Meeker D.** Finite Element Method Magnetics. User's manual. Version 4.0. June 17, 2004.
25. **Симонов Б.Ф., Нейман В.Ю., Шабанов А.С.** Импульсный линейный электромагнитный привод для скважинного виброисточника // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 118–126.
26. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, А.А. Скотников, О.В. Рогова // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50а–53.
27. **Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A.** Calculation of efficiency of a DC power electromagnet for mechanotronic systems // The Third International Forum on Strategic Technologies: Proceedings of IFOST 2008. – Novosibirsk, 2008. – P. 452–454.
28. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Математическая модель динамики электромагнитного ударного узла с упругими связями // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 2 (31). – С. 94–107. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-2-94-107.
29. **Дьяконов В.П.** Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 976 с.
30. **Павлов В.Е.** Исследование режимов работы длинноходового электромагнитного молота методом компьютерного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23, № 2 (145). – С. 260–270. – DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.
31. **Нейман Л.А., Нейман В.Ю.** Линейные синхронные электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. – 480 с. – (Монографии НГТУ).

## MATHEMATICAL MODEL OF AN ELECTROMAGNETIC DRIVE OF THE SEISMIC SOURCE

**Neyman V.Yu., Neyman L.A.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The relevance of the study is determined by the prospects for the practical use of electromagnetic seismic sources in shallow seismic exploration, as well as the need to improve the methods of their dynamic calculation. The object of the study is an adjustable electromagnetic drive of a seismic source with an elastic striker reverser. The main objective of the research is to create a more accurate mathematical model of the electromagnetic drive of a seismic source. Based on the equation of the electrical state of the system and the Lagrange equations of the second kind, a refined mathematical model of the dynamics of an electromagnetic drive has been developed in the form of a system of differential equations taking into account the interaction of inertial masses connected by elastic links. The model takes into account the nonlinear properties of the structural materials used, as well as leakage fluxes, and various types of energy losses in the electro-mechanical system. Using the model allows for the analysis of the dynamic state of an electromagnetic seismic source over a wide range of input parameters and improves the

design quality. The results of the presented research may be of particular interest to specialists in the field of calculation and design of electromagnetic pulse impact power systems.

**Keywords:** seismic exploration, electromagnetic seismic source, electromagnetic impact drive, mathematical model, Lagrange equations of the second kind, numerical method, structural modeling methods, magnetic field, electromechanical processes.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53

#### REFERENCES

1. Shneerson M.B., ed. *Teoriya i praktika nazemnoi nevzryvnoi seismorazvedki* [Theory and practice of ground non-explosive seismic exploration]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 527 p.
2. Shneerson M.B. Osnovnye napravleniya razvitiya tekhnologii polevykh rabot nazemnoi seismorazvedki [Basis survey directions of developments in onshore seismic acquisition]. *Ekspozitsiya Neft Gaz = Exposition Oil Gas*, 2020, no. 1 (74), pp. 16–19. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10065.
3. Bakulin A., Silvestrov I., Pevzner R. Surface seismics with DAS: An emerging alternative to modern point-sensor acquisition. *The Leading Edge*, 2020, vol. 39 (11), pp. 808–818. DOI: 10.1190/tle39110808.1.
4. Ivashin V.V., Pevchev V.P. K voprosu razvitiya impul'snykh nazemnykh seismoistochnikov dlya seismorazvedki [On the problem of the development of impulse ground seismic sources for seismic exploration]. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*, 2012, no. 2, pp. 313–321.
5. Neiman L.A., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. A simplified calculation of the intermittent periodic operating regime of an electromagnetic impact drive. *Russian Electrical Engineering*, 2014, vol. 85 (12), pp. 757–760. DOI: 10.3103/S1068371214120104. Translated from *Elektrotehnika*, 2014, no. 12, pp. 50–53.
6. Neyman V.Yu., Evreinov D.M., Neyman L.A., Skotnikov A.A., Smirnova Yu.B. Sposoby povysheniya energeticheskikh pokazatelei odnoobmotochnykh impul'snykh ustroystv s elektromagnitnym vzbuzhdeniem [Ways to improve the energy performance of single-winding pulsed devices with electromagnetic excitation]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie = Transportation: Science, Technology, Management*, 2010, no. 8, pp. 29–31.
7. Seleznev V.A., Zhivodrov V.A., Ugarov G.G., Usanov K.M. Printsipy povysheniya effektivnosti impul'snykh elektromagnitnykh seismoistochnikov maloi moshchnosti dlya issledovaniya malykh glubin [Principles of increasing the efficiency of low-power pulsed electromagnetic seismic sources for shallow depth research]. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 2003, no. 1 (03), pp. 28–29. (In Russian).
8. Pevchev V.P. The superexcitation and efficiency relation in a short-stroke pulsed electromagnetic motor of a seismic source. *Journal of Mining Science*, 2010, vol. 46 (6), pp. 656–665. DOI: 10.1007/s10913-010-0083-9. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2010, no. 6, pp. 77–78.
9. Neyman V.Yu. K voprosu o ratsionalizatsii rabochikh protsessov i vybora konstruktivnykh skhem elektromagnitnykh udarnykh mashin [On the issue of rationalization of work processes and selection of design schemes for electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Ed. by V.N. Anosov. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004, pp. 155–169.

10. Britkov N.A., Malakhov A.P., Ryashentsev N.P., Kopeikin A.P., Shcherba G.G. Elektromagnitnyi impul'snyi seismoistochnik maloi moshchnosti [Low power electromagnetic pulse seismic source]. *Elektromagnitnye impul'snye sistemy* [Electromagnetic pulse systems]. Novosibirsk, Institute of Mining SB AN USSR Publ., 1982, pp. 160–166.
11. Ugarov G.G., Usanov K.M., Neiman V.Yu. Operating cycle of an electromagnetic percussion machine with storage of magnetic energy during the no-load period. *Journal of Mining Science*, 1997, vol. 33 (3), pp. 253–257. DOI: 10.1007/BF02765651. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1997, no. 3, pp. 76–80.
12. Usanov K.M., Volgin A.V., Chetverikov E.A., Kargin V.A., Moiseev A.P., Ivanova Z.I. Strike action electromagnetic machine for immersion of rod elements into ground. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, p. 032050. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032050.
13. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Skotnikov A.A. Strukturnyi analiz sinkhronnykh elektromagnitnykh mashin udarnogo deistviya [Structural analysis of synchronous electromagnetic impact machines]. *Avtomatizirovannye elektromekhanicheskie sistemy* [Automated electromechanical systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, pp. 106–120.
14. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Dinamicheskaya model' elektromagnitnogo privoda ko-lebatel'nogo dvizheniya dlya sistem generirovaniya nizkочастотных vibratsii [Oscillatory motion electro-magnetic drive dynamic model for low-frequency vibration generation systems]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 3 (28), pp. 75–87. DOI: 10.17212/1727-2769-2015-3-75-87.
15. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., Fedonin V.N., Malov A.T. *Elektroprivod s lineinymi elektromagnitnymi dvigatelyami* [Electric drive with linear electromagnetic motors]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 150 p.
16. Ryashentsev N.P., Ugarov G.G., L'vitsin A.V. *Elektromagnitnye pressy* [Electromagnetic presses]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 216 p.
17. Simonov B.F., Kordubailo A.O., Neiman V.Y., Neiman L.A. Simulation modeling of operation of downhole vibration exciter EM drive. *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56 (3), pp. 435–444. DOI: 10.1134/S1062739120036726. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2020, no. 3, pp. 120–130. DOI: 10.15372/FTPRPI20200312.
18. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki dvukhkatu-shechnoi sinkhronnoi elektromagnitnoi mashiny udarnogo deistviya so svobodnym vybegom boika [Mathematical model of the dynamics of a two-coil synchronous electromagnetic impact machine with a free run-out striker]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, no. 5, pp. 32–40. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.5.032-040.
19. Manzhosov V.K., Lukutina N.O., Nevenchannaya T.O. *Dinamika i sintez elektromagnitnykh generatorov silovykh impul'sov* [The dynamics and synthesis of electromagnetic power pulse generators]. Frunze, Ilim Publ., 1985. 119 p.
20. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Raschet dinamiki elektromagnitnogo privoda kolebatel'nogo dvizheniya s odnopoluperiodnym vypryamitelem [The calculation of the dynamics of the magnetic drive of oscillatory motion with half-wave rectifier]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Bulletin of MPEI*, 2016, no. 6, pp. 64–71.

21. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Modelirovanie protsessov v elektromagnitnom vibratsionnom preobrazovatele s poteryami energii v magnitoprovoде [Modelling of processes in the electromagnetic vibration transducer with energy losses in the yoke]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* = *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 73–78. DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-73-78.
22. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 576 p.
23. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskoi sistemy kolebatelnogo dvizheniya s uprugimi svyaziyami [Mathematical model of a vibratory electromechanical system with spring linkages]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* = *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2015, no. 6, pp. 35–40. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.035-040.
24. Meeker D. *Finite Element Method Magnetics*. User's Manual. Version 4.0. June 17, 2004.
25. Simonov B.F., Neiman V.Yu., Shabanov A.S. Pulsed linear solenoid actuator for deep-well vibration source. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53 (1), pp. 117–125. DOI: 10.1134/S1062739117011921. Translated from *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2017, no. 1, pp. 118–126.
26. Neiman V.Yu., A. N. Neiman L.N., Petrova A.A., Skotnikov A.A., Petrova A.A., Rogova O.V. On the issue of taking into account the main dimensions when choosing the type of electromagnet according to the value of the constructive factor. *Russian Electrical Engineering*, 2011, vol. 82 (6), pp. 328–331. DOI: 10.3103/S1068371211060095. Translated from *Elektrotehnika*, 2011, no. 6, pp. 50a–53.
27. Neyman V.Yu., Neyman L.A., Petrova A.A. Calculation of efficiency of a DC power electromagnet for mechanotronic systems. *The Third International Forum on Strategic Technologies: Proceedings of IFOST 2008*. Novosibirsk, 2008, pp. 452–454.
28. Neyman L.A., Neyman V.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki elektromagnitnogo udarnogo uzla s uprugimi svyaziyami [A dynamic mathematical model of the electromagnetic impact unit with spring linkages]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2016, no. 2 (31), pp. 94–107. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-2-94-107.
29. D'yakonov V.P. *Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov* [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow, DMK Press, 2016. 976 p.
30. Pavlov V.E. Issledovanie rezhimov raboty dlinnokhodovogo elektromagnitnogo molota metodom komp'yuternogo modelirovaniya [Study of long-stroke electromagnetic hammer operation modes by computer simulation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2019, vol. 23, no. 2 (145), pp. 260–270. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-260-270.
31. Neyman L.A., Neyman V.Yu. *Lineinye sinkhronnye elektromagnitnye mashiny udarnogo deistviya* [Linear synchronous electromagnetic impact machines]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2021. 480 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Нейман Владимир Юрьевич** – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовые электромагнитные импульсные системы. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: nv\_nstu@mail.ru).

**Neyman Vladimir Yurievich** (b. 1960), Doctor of Sciences (Eng.), professor, Head of the Department of Theory of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electromagnetic pulse systems. More than 300 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: nv\_nstu@mail.ru).



**Нейман Людмила Андреевна** – родилась в 1966 году, д-р техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: линейные синхронные электромагнитные машины и технологии. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: neyman31@gmail.com).

**Neyman Lyudmila Andreevna** (b. 1966) – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the Electrotechnological Units Department in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include linear synchronous electromagnetic machines and technology. She is the author of 150 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: neyman31@gmail.com).

*Статья поступила 28 января 2026 г.  
Received January 28, 2026*

---

To Reference:

Neyman V.Yu., Neyman L.A. Matematicheskaya model' elektromagnitnogo privoda seismoistochnika [Mathematical model of an electromagnetic drive of the seismic source]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 38–53. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-38-53.

УДК 621.565.944

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА-РЕГЕНЕРАТОРА АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

А.В. Чичиндаев<sup>1</sup>, М.Р. Выборов<sup>1</sup>, И.В. Хромова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет водного транспорта

В настоящее время ведутся работы по испытаниям отечественных импортозамещенных пассажирских самолетов Суперджет-100, МС-21 и Ту-214. Одной из важных систем данных самолетов является система кондиционирования воздуха. Отличительной чертой системы является технология отделения влаги в линии высокого давления. Для этого применяется специальная подсистема – конденсаторный блок, состоящий из трех агрегатов: теплообменника-конденсатора, теплообменника-регенератора и влагоотделителя. Назначение теплообменника-регенератора – обеспечить работу конденсаторного блока за счет повышения эффективности работы его главного элемента – теплообменника-конденсатора и предотвращения его обмерзания. Иностранные компании предлагают классический способ проектирования теплообменника-регенератора. Данная статья посвящена исследованию работы перспективной инновационной модели для импортозамещения теплообменника-регенератора. На кафедре технической теплофизики НГТУ в результате многолетних работ предложен более эффективный способ проектирования теплообменника с позиции повышения его эффективности работы. В основе лежит глубокое изучение особенностей процесса теплопередачи в перекрестно-точном компактном пластинчато-ребристом теплообменнике. В частности, предложено вместо создания стандартной конструкции, используемой на иностранных самолетах, «управлять» температурой его теплопередающей поверхности для заданных эксплуатационных условий. В основе методики лежит идея изменения параметров оребрений с горячей и холодной стороны поверхности. Расчеты выполнялись с помощью специализированного авторского пакета программ кафедры технической теплофизики НГТУ. В работе изложены результаты исследования процессов теплопередачи одного из перспективных вариантов решения данной задачи.

*Ключевые слова:* система кондиционирования воздуха, теплообменник-регенератор, влажный воздух, конденсация, испарение, компактный пластинчато-ребристый теплообменник, шаг оребрений, температура теплопередающей поверхности.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64

### Введение

В современных авиационных системах кондиционирования воздуха (СКВ) для пассажирских самолетов используется достаточно экономичная схема типа «петля» [1, 2]. Отличительной ее особенностью является наличие специальной подсистемы – конденсаторного блока [2], установленного

в линии высокого давления СКВ и предназначенного для конденсации водяных паров из влажного воздуха с последующим их удалением. Конденсаторный блок состоит из трех основных элементов (рис. 1): теплообменника-конденсатора (слева) для конденсации водяных паров, влагоотделителя (снизу) для отделения воды из воздуха и теплообменника-регенератора (справа) для испарения неотделенной влаги.



Рис. 1 – Устройство конденсаторного блока

Fig. 1 – The device of the condenser unit

Назначение теплообменника-регенератора: 1) обеспечить доиспарение капельной влаги, которую не смог удалить влагоотделитель, чтобы предотвратить обмерзание; 2) снизить температуру воздуха за основным теплообменником узла предварительного охлаждения с  $70...100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до требуемых для теплообменника-конденсатора рабочих значений  $30...40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в этом случае на его выходе будет температура  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , пригодная для максимального отделения влаги и предотвращения обмерзания влагоотделителя).

Термин «теплообменник-регенератор» в классическом понимании обозначает передачу теплоты от «отработанного – выбрасываемого» горячего воздуха СКВ (газа) «свежему – поступающему» холодному с целью экономии энергии. В авиационных СКВ современных пассажирских самолетов термин «регенератор» используется для описания отдельного направления. В первых СКВ типа «петля» [1, 2] такого теплообменника не было, а был один конденсатор (СКВ с однократной регенерацией). Это приводило к обмерзанию как конденсатора, так и турбохолодильной установки. Тогда и было предложено ввести в СКВ теплообменник-регенератор [3–5]. Он стал входным теплообменником в конденсаторный блок и имел температуру горячего воздуха  $70...100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для его охлаждения в регенераторе использовали выходную температуру воздуха из конденсатора  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оба теплообменника стоят в линии высокого давления СКВ, теплота передается из одной части конденсаторного блока в другую. По классификации авиационных СКВ это схема с двойной регенерацией. При этом практически исчезли проблемы с обмерзанием.

Инженеры фирм Boeing и Airbus [3–5] предложили при проектировании теплообменника-регенератора использовать стандартную методику расчета компактного пластинчато-ребристого теплообменника (КПРТ), у которого 50 % поверхности работает в эффективной области и 50 % – в неэффективной. В настоящей работе приведены результаты исследований по методике с переменным оребрением, предложенной на кафедре технической теплофизики НГТУ [1]. Наиболее детально данный прием и методика расчета изложены в работе [6]. Расчеты выполнялись с помощью специализированного авторского пакета программ кафедры технической теплофизики НГТУ [7, 8]. Ниже приведены результаты первичных исследований для одного из благоприятных сочетаний параметров оребрений.

### **Исследование теплообменника-регенератора с переменным оребрением**

Общая идея изменения оребрений состояла в снижении и выравнивании температуры теплопередающей поверхности. Это позволяет добиться более эффективного охлаждения горячего воздуха и нагрева холодного. В работе выполнен анализ и выбор оптимального теплообменника из трех исследований: изменение шага горячего оребрения, изменение шага холодного оребрения, а также шага обоих оребрений одновременно. Исходные данные для каждого варианта, такие как параметры теплоносителей (табл. 1) и геометрия оребрений (табл. 2), были идентичны.

Таблица 1 / Table 1

**Параметры теплоносителей**  
**Coolant parameters**

| Оребрение | Расход, кг/с | Температура, °С | Давление, кПа | Влагосодержание, г/кг |
|-----------|--------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| Горячее   | 0,5          | 70,0            | 400,0         | 0,0                   |
| Холодное  | 0,5          | 5,0             | 100,0         | 0,0                   |

Таблица 2 / Table 2

**Геометрия оребрений**  
**Fin geometry**

| Оребрение | Высота, мм | Эквивалентный диаметр оребрения, мм | Шаг оребрения, мм | Толщина ребра, мм | Коэффициент оребрения поверхности |
|-----------|------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Горячее   | 4,00       | 1,56                                | 2,0               | 0,15              | 0,69                              |
| Холодное  | 4,00       | 1,56                                | 2,0               | 0,15              | 0,69                              |

### **Серия 1. Исследование параметров теплообменника при изменении шага горячего оребрения**

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага горячего оребрения (табл. 3). Первый вариант соответствует случаю стандартной компоновки КПРТ с постоян-

ными оребрениями по длине горячего и холодного тракта и является базовым для сравнения. Варианты 2–4 отличаются от базового за счет увеличения шага между ребрами горячего оребрения. В частности, цифры в табл. 3 показывают, во сколько раз увеличивается шаг между ребрами: в базовом варианте он равен 2 мм, если стоит цифра «4», то шаг равен уже 8 мм. Это позволяет за счет изменения процесса теплопередачи уменьшить температуру поверхности.

Таблица 3 / Table 3

**Варианты теплообменников (серия 1)**  
**Heat exchanger options (series 1)**

| Номер варианта | Теплоноситель | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 |
|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 1, 2, 3, 4     | Холодный      | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 1              | Горячий       | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 2              | Горячий       | 4     | 2     | 1     | 1     |
| 3              | Горячий       | 6     | 3     | 1,5   | 1     |
| 4              | Горячий       | 8     | 4     | 2     | 1     |

Распределение температуры горячего теплоносителя показано на рис. 2.

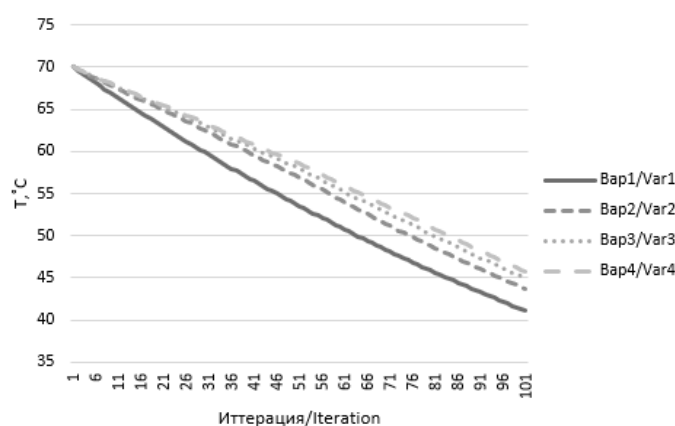


Рис. 2 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 1)

Fig. 2 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 1)

Распределение температуры холодного теплоносителя и теплопередающей поверхности показано на рис. 3 и 4 соответственно.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

1) изменение шага горячего оребрения снизило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя увеличилась до 4 °С в сравнении с базовой, холодного – уменьшилась до 5 °С;

2) сравнение температуры теплопередающей поверхности показало линейное снижение температуры по всей длине поверхности в пределах до 5...7 °С.

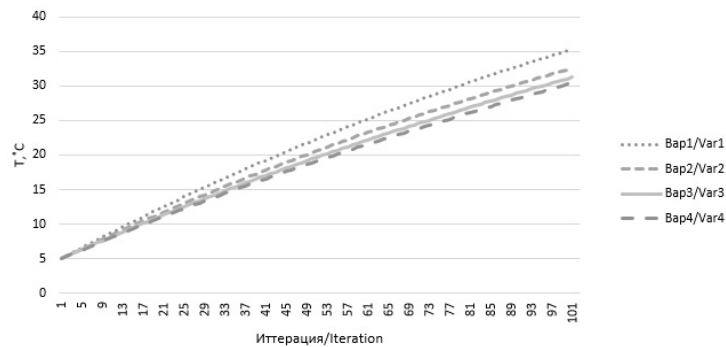


Рис. 3 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 1)

Fig. 3 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 1)

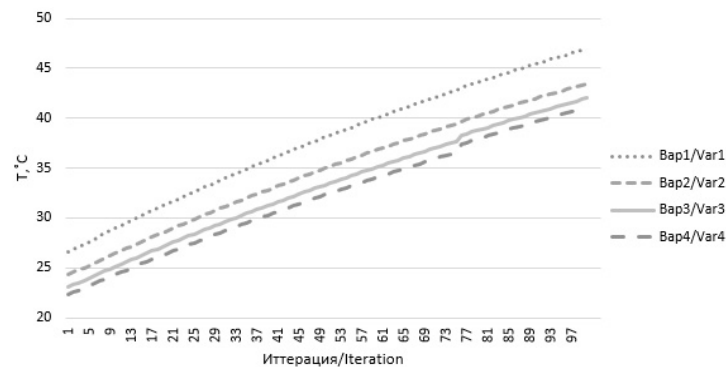


Рис. 4 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 1)

Fig. 4 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 1)

### Серия 2. Исследование параметров теплообменника при изменении шага холодного оребрения

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага холодного оребрения (табл. 4). В частности, цифры показывают уменьшение шага между ребрами от базовых 2 мм.

Таблица 4 / Table 4

Варианты теплообменников (серия 2)  
Heat exchanger options (series 2)

| Номер варианта | Теплоноситель | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 |
|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 1, 2, 3, 4     | Горячий       | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 1              | Холодный      | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 2              | Холодный      | 0,75  | 0,5   | 0,33  | 0,25  |
| 3              | Холодный      | 0,5   | 0,33  | 0,25  | 0,15  |
| 4              | Холодный      | 0,33  | 0,25  | 0,15  | 0,15  |

Распределение температуры горячего и холодного теплоносителя показано на рис. 5 и 6 соответственно.

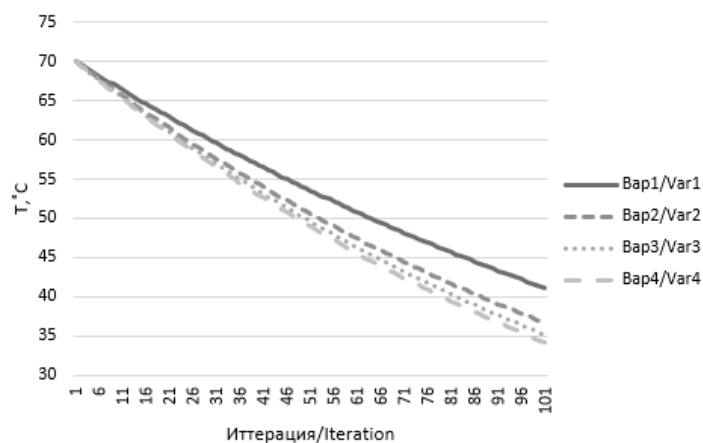


Рис. 5 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 2)

Fig. 5 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 2)

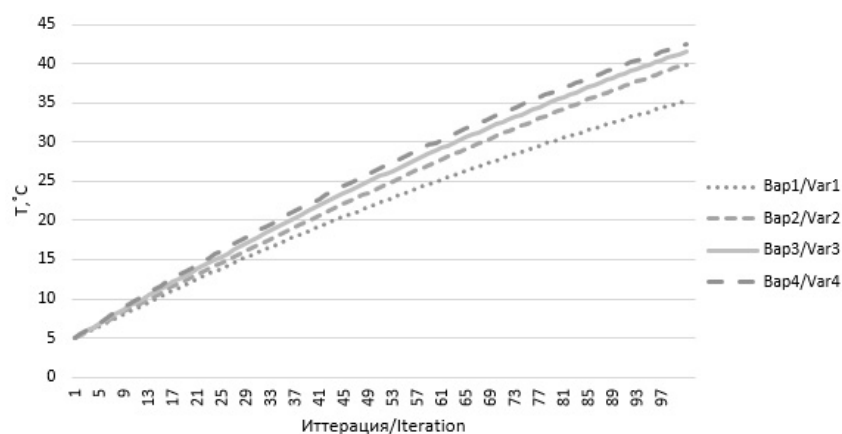


Рис. 6 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 2)

Fig. 6 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 2)

Распределение температуры теплопередающей поверхности показано на рис. 7.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

- 1) изменение шага холодного обребрения повысило эффективность процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя уменьшилась до 7 °С в сравнении с базовой, холодного – увеличилась до 8 °С;
- 2) температура теплопередающей поверхности нелинейно уменьшилась по всей длине поверхности в пределах до 5...17 °С, максимально – на входных, самых холодных кромках.

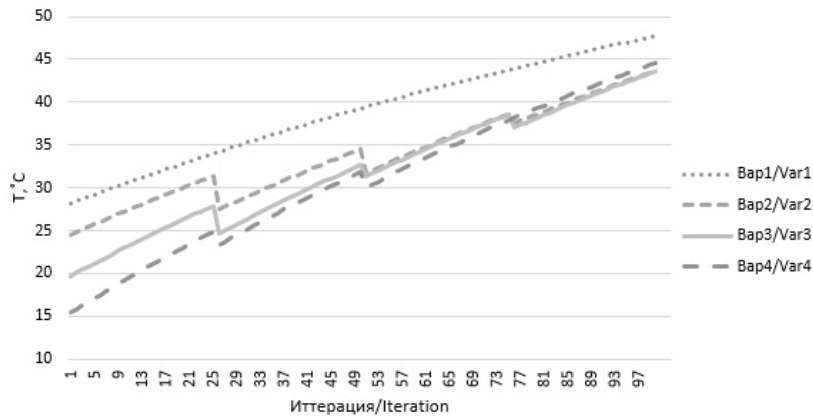


Рис. 7 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 2)

Fig. 7 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 2)

### Серия 3. Исследование параметров теплообменника при изменении шага обоих оребрений

В данной серии расчетов рассматривается вариант теплообменника-регенератора с изменением шага горячего и холодного оребрения (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Варианты теплообменников (серия 3)  
Heat exchanger options (series 3)

| Номер варианта | Теплоноситель | Шаг 1 | Шаг 2 | Шаг 3 | Шаг 4 |
|----------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 1              | Горячий       | 1     | 1     | 1     | 1     |
|                | Холодный      | 1     | 1     | 1     | 1     |
| 2              | Горячий       | 4     | 0,5   | 0,33  | 0,25  |
|                | Холодный      | 0,75  | 0,5   | 0,33  | 0,25  |
| 3              | Горячий       | 6     | 3     | 1,5   | 1     |
|                | Холодный      | 0,5   | 0,33  | 0,25  | 0,15  |
| 4              | Горячий       | 8     | 4     | 2     | 1     |
|                | Холодный      | 0,33  | 0,25  | 0,15  | 0,15  |

Распределение температуры горячего теплоносителя показано на рис. 8, холодного теплоносителя – на рис. 9, теплопередающей поверхности – на рис. 10.

В результате проведенного расчета получены следующие результаты:

1) изменение шага обоих оребрений нелинейно сказалось на эффективности процесса теплопередачи: температура горячего теплоносителя не изменилась в сравнении с базовой, холодного – снизилась до 7 °С;

2) сравнение температуры теплопередающей поверхности показало ее нелинейный рост по всей длине поверхности в пределах до 10...20 °С на входных, самых холодных кромках теплообменника-регенератора.

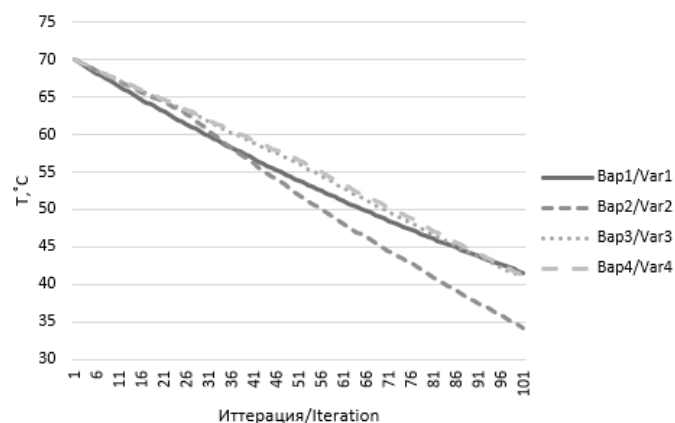


Рис. 8 – График перепада температуры горячего теплоносителя (серия 3)

Fig. 8 – Graph of the temperature drop of a hot coolant (series 3)

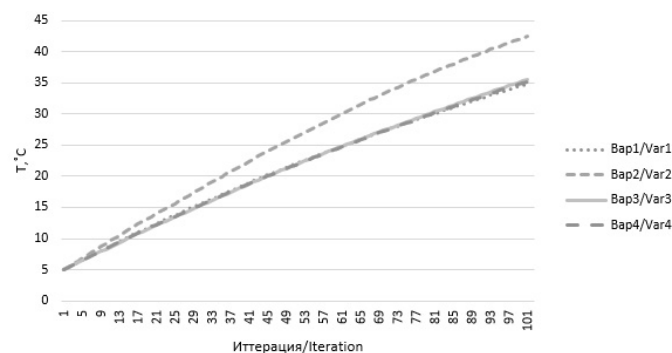


Рис. 9 – График перепада температуры холодного теплоносителя (серия 3)

Fig. 9 – Graph of the temperature drop of a cold coolant (series 3)

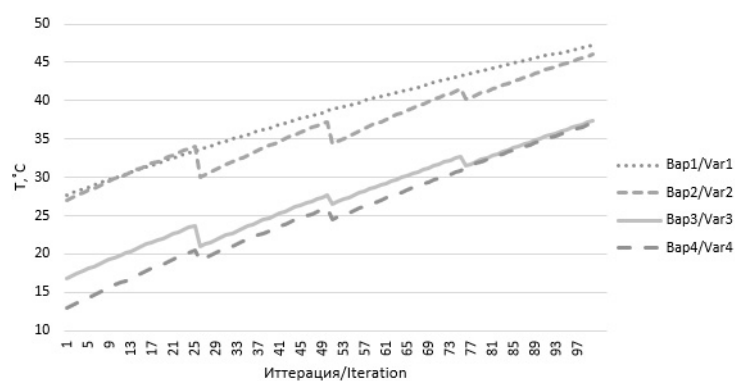


Рис. 10 – График перепада температуры теплопередающей поверхности (серия 3)

Fig. 10 – Graph of the temperature drop of the heat transfer surface plate (series 3)

### Заключение

В работе выполнен комплекс исследований распределения температуры горячего и холодного теплоносителей, а также теплопередающей поверхности при изменении шага оребрения в КППТ. Изменение шага оребрения в горячем и холодном трактах приводит к кардинальным изменениям в распределении температур в теплообменнике-регенераторе. При переменном горячем оребрении наблюдается линейное снижение температуры поверхности по всей длине. При переменном холодном оребрении установлено нелинейное снижение температуры на входных сечениях КППТ. При совместном изменении шага обоих оребрений снижение температуры немного больше, чем при изменении только холодного. С позиции распределения температур теплоносителей предпочтителен вариант смены холодного оребрения, так как в этом случае наблюдается снижение температуры горячего теплоносителя при одновременном росте температуры холодного.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы жизнеобеспечения и оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / А.В. Чичиндаев, Ю.В. Дьяченко, В.А. Спарин, И.В. Хромова; под ред. А.В. Чичиндаева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 319 с. – (Учебники НГТУ).
2. **Чичиндаев А.В., Хромова И.В.** Массовый открытый онлайн-курс «Современные авиационные системы кондиционирования воздуха». 2022. – URL: <https://stepik.org/112062> (дата обращения: 15.05.2026).
3. Patent № 4198830 US. Fluid conditioning apparatus and system: publ. 22.04.1980 / Carl D. Campbell.
4. Patent № 4246963 US. Heat exchanger: publ. 27.01.1981 / Alexander F. Anderson.
5. Patent № 4352273 US. Fluid conditioning apparatus and system: publ. 05.10.1982 / Robert C. Kinsell, Michael P. Saba, James E. Strang.
6. **Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Meshkov A.A.** Aircraft heat exchanger-condenser: modeling the features of heat transfer process // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): Proceedings of the 15 International scientific-technical conference. – Novosibirsk, 2021. – P. 640–643. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647675.
7. **Чичиндаев А.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661213 «Программа расчета теплообменника-конденсатора», 10 июня 2022 г.
8. **Чичиндаев А.В., Хромова И.В.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663673 «Программа расчета теплообменника-конденсатора с переменным оребрением», 19 июля 2022 г.

### STUDY OF THE OPERATION OF A HEAT EXCHANGER-REGENERATOR OF AIRCRAFT AIR CONDITIONING SYSTEM

**Chichindaev A.V.<sup>1</sup>, Vyborov M.R.<sup>1</sup>, Khromova I.V.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

Currently, work is underway on testing domestic import-substituted passenger aircraft Superjet-100, MC-21, Tu-214. The air conditioning system is one of the important

ones for this. A distinctive feature of the system is the technology of moisture separation in the high-pressure line. For this purpose, a special subsystem is used – a condenser unit consisting of three units: a condenser heat exchanger, a regenerator heat exchanger and a dehumidifier. The purpose of the heat exchanger-regenerator is to ensure the operation of the condenser unit from the perspective of increasing the efficiency of its main mainly, the condenser heat exchanger, and preventing its freezing. Foreign companies offer a classic way of designing a heat exchanger-regenerator. This article is devoted to the study of a promising innovative model for a heat exchanger-regenerator. As a result of many years of work, the Department of Technical Thermophysics at NSTU has proposed a more efficient way of designing a heat exchanger from the perspective of increasing its efficiency. In particular, instead of creating a standard design, it is proposed to "control" the temperature of the heat transfer surface for specified operating conditions. The technique is based on the idea of changing the parameters of the fins from the hot and cold sides of the surface. The calculations were performed using the author's specialized software package from the Department of Technical Thermophysics at NSTU. The paper presents the results of primary studies of heat transfer processes, one of the promising solutions to this problem.

**Keywords:** air conditioning system, heat exchanger-regenerator, humid air, condensation, evaporation, compact plate-fin heat exchanger, fin pitch, heat transfer surface temperature.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64

#### REFERENCES

1. Chichindaev A.V., D'yachenko Yu.V., Sparin V.A., Khromova I.V. *Sistemy zhizneobespecheniya i oborudovanie letatel'nykh apparatov* [Life support systems and equipment for aircraft]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2019. 319 p.
2. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Massovyi otkrytyi onlain-kurs «Sovremennye aviatsionnye sistemy konditsionirovaniya vozdukha»* [Massive open online course "Modern aviation air conditioning systems"]. 2022. Available at: <https://stepik.org/112062> (accessed 15.05.2026).
3. Campbell C.D. *Fluid conditioning apparatus and system*. Patent US, no. 4198830, 1980.
4. Anderson A.F. *Heat exchanger*. Patent US, no. 4246963, 1981.
5. Kinsell R.C., Saba M.P., Strang J.E. *Fluid conditioning apparatus and system*. Patent US, no. 4352273, 1982.
6. Chichindaev A.V., Dyachenko Y.V., Meshkov A.A. Aircraft heat exchanger-condenser: modeling the features of heat transfer process. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): Proceedings of the 15 International scientific-technical conference*. Novosibirsk, 2021, pp. 640–643. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647675.
7. Chichindaev A.V. *Programma rascheta teploobmennika-kondensatora* [Heat exchanger-condenser calculation program]. Certificate of state registration of computer program No. 2022661213, 2022.
8. Chichindaev A.V., Khromova I.V. *Programma rascheta teploobmennika-kondensatora s peremennym orebreniem* [Program for calculating a heat exchanger-condenser with variable fins]. Certificate of state registration of computer program No. 2022663673, 2022.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Чичиндаев Александр Васильевич** – родился в 1960 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 350 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).

**Chichindaev Aleksandr Vasil'evich** (b. 1960) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, Professor of the Department Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on thermal physics and theoretical heat engineering. He is the author of 350 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chichindaev@corp.nstu.ru).



**Выборов Максим Романович** – родился в 1998 году, аспирант кафедры технической теплофизики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано 4 научных работы (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vyborov.2016@stud.nstu.ru).

**Vyborov Maxim Romanovich** (b. 1998) – Postgraduate student at the Department of Engineering Thermophysics, Novosibirsk State Technical University. His research interests include thermal physics, nad theoretical thermal engineering. He is the author of 4 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vyborov.2016@stud.nstu.ru).



**Хромова Ирина Владимировна** – родилась в 1983 году, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технической механики и подъемно-транспортных машин Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теплофизика, теоретическая теплотехника. Опубликовано более 85 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: i@ihromova.ru).

**Khromova Irina Vladimirovna** (b. 1983) – Candidate of Sciences (Eng.), assistant professor, associate professor Department of Engineering Mechanics and Lifting and Transport Machines, Siberian State University of Water Transport. Her research interests are currently focused on thermal physics, theoretical the heating engineering. She is the author of 85 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: i@ihromova.ru).

Статья поступила 11 сентября 2025 г.  
Received September 11, 2025

## To Reference:

Chichindaev A.V., Vyborov M.R., Khromova I.V. Issledovanie raboty teploobmennika regeneratora aviatsionnoi sistemy konditsionirovaniya vozdukhа [Study of the operation of a heat exchanger-regenerator of aircraft air conditioning system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 54–64. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-54-64.

УДК 621.313.2:615.014.4

**ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ЭКСТРУДЕРА  
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ АСЕПТИЧЕСКОГО РОЗЛИВА  
ЖИДКОСТЕЙ****А.А. Темляков***Новосибирский государственный технический университет*

В статье рассматривается инженерно-техническое решение по замене двигателя постоянного тока (ДПТ) Siemens привода экструдера автоматизированной линии асептического розлива bottelpack (BFS-технология) на отечественный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД КРЗ). Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения технологического суверенитета фармацевтических производств в условиях санкционных ограничений и отсутствия прямой технической поддержки производителя. Для принятия рационального решения выполнено обоснование выбора компонентов, разработана и внедрена схема аппаратной интеграции нового привода с существующей системой управления линией.

В результате модернизации двигателя достигнут значительный технико-экономический эффект, заключающийся в снижении времени простоев, а также в росте производительности линии. Дополнительным преимуществом стало отсутствие графитовой пыли от щеточно-коллекторного узла, что повысило экологичность производства в чистых зонах. Практическая значимость работы заключается в участии глубокой модернизации сложного фармацевтического оборудования, которая может быть использована на аналогичных производствах.

*Ключевые слова:* импортозамещение, BFS-технология, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, экструдер, фармацевтическое оборудование, технологический суверенитет, чистые помещения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-65-70

**Введение**

Импортозамещение в фармацевтической отрасли Российской Федерации перестало быть сугубо экономической категорией. В настоящее время это комплексная стратегия обеспечения национальной безопасности в сфере здравоохранения. Критическим звеном данной стратегии является не только воспроизводство готовых лекарственных форм, но и создание собственной базы фармацевтического машиностроения [1].

Оборудование для производства стерильных инъекционных препаратов по технологии BFS (Blow-Fill-Seal) исторически относится к категории высокотехнологичных и наукоемких средств производства [2]. Мировой рынок BFS-оборудования консолидирован: ключевыми игроками выступают швейцарская Rommelag, итальянская Brevetti Angela, а также ряд американских и немецких компаний. До 2022 г. парк оборудования российских фармпроизводителей был представлен преимущественно импортными

линиями, в первую очередь bottelpack компании Rommelag. Уход западных сервисных служб и прекращение прямых поставок запчастей сформировали операционные риски для отечественных предприятий.

### **1. BFS-технология и роль экструдера в производственном цикле**

BFS-технология является отраслевым стандартом для асептического розлива жидкостей в пластиковые контейнеры малого и среднего объема [3]. Процесс включает три неразрывные стадии: экструзию расплавленного полимера через головку с формированием трубчатой заготовки (парисона), выдув контейнера в пресс-форме, дозированное наполнение раствором и герметизацию.

Принципиальным преимуществом BFS-технологии является минимизация человеческого фактора и воздействия внешней среды. Однако реализация данного преимущества невозможна без абсолютной стабильности технологических параметров. Экструдер выполняет функцию преобразования твердых гранул фармакопейного полиэтилена или полипропилена в гомогенный расплав.

Ключевые требования к приводу экструдера:

- 1) постоянство момента на шнеке при колебаниях вязкости расплава и противодавления в фильтре;
- 2) высокий пусковой момент (необходим для страгивания заполненного холодным полимером шнека после остановок);
- 3) широкий диапазон регулирования скорости (для адаптации производительности под типоразмер контейнера);
- 4) минимальное пылевыведение (критично для чистых помещений класса В и зон класса А).

Штатный привод линии bottelpack независимого возбуждения Siemens 1GH6162-0JD70-6WV5-Z исторически обеспечивал хорошие регулировочные свойства, однако его эксплуатация в условиях фармпроизводства выявила ряд системных недостатков, к числу которых относятся недостатки ДПТ Siemens 1GH6162.

### **2. Анализ недостатков ДПТ Siemens 1GH6162**

#### **1. Щеточно-коллекторный узел как источник загрязнений.**

Трение графитовых щеток о коллектор неизбежно генерирует токопроводящую графитовую пыль. В условиях чистых помещений класса В наличие источника пыли недопустимо. Для компенсации этого фактора линия оснащена дополнительной локальной вытяжной вентиляцией, что усложняет конструкцию и требует верификации аэродинамики воздушных потоков.

#### **2. Низкая ремонтпригодность и ресурс.**

Ресурс щеток ограничен (8–12 месяцев). Износ коллектора требовал периодической проточки и шлифовки. Операции по замене щеток и обслуживанию коллектора являются трудоемкими и требуют длительной остановки линии.

### 3. Чувствительность к пусковым режимам.

При повторных пусках горячего экструдера возникали броски тока, вызывающие подгорание ламелей коллектора, что кратно снижало ресурс.

### 4. Логистическая уязвимость.

Двигатель является импортным. Заказ нового агрегата или комплекта щеток через параллельный импорт приводил к увеличению срока поставки до 6–12 месяцев и росту стоимости.

## **3. Замена двигателя постоянного тока на асинхронный частотно-регулируемый двигатель**

Перед инженерной службой, обслуживающей привод экструдера автоматизированной линии асептического розлива, стояла задача не просто восстановить работоспособность линии, а повысить ее технологическую гибкость и снизить операционные затраты, полностью исключив зависимость от импортных поставок.

Применение традиционных двигателей постоянного тока в долгосрочной перспективе не отвечает критериям надежности и импортнезависимости из-за наличия дорогостоящего и быстроизнашиваемого коллекторно-щеточного узла, требующего постоянного обслуживания.

В качестве альтернативы была предложена и обоснована замена ДПТ на асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД КЗР). Выбор этого двигателя обусловлен его предельной конструктивной простотой, отсутствием скользящих контактов, высокой ремонтпригодностью и массовой доступностью компонентов российского производства [4].

При решении поставленной задачи возникла проблема, связанная с тем, что классические методы расчета асинхронных двигателей, включая аналитические модели электрических машин, исторически строятся из допущения о синусоидальности питающей сети. Однако при работе двигателя совместно с преобразователем частоты на обмотки воздействует не непрерывный синусоидальный сигнал, а последовательность высокочастотных прямоугольных импульсов, лишь эквивалентно формирующих основную гармонику тока [5, 6]. При таком импульсном питании в магнитопроводе и обмотках возникают дополнительные потери от высших гармоник, пульсации момента и локальные перегревы, которые невозможно адекватно описать в рамках традиционных аналитических моделей, основанных на синусоидальном приближении.

Именно поэтому для качественного проектирования АД КЗР было предложено применение методов, базирующихся на численном моделировании электромагнитных процессов, которое позволяет учитывать геометрические особенности конструктивных элементов, зависимость свойств материалов от моделируемого поля, величину и форму несинусоидального напряжения, подаваемого на обмотку якоря, а также режимы работы. Наиболее эффективным для этого является применение метода конечных элементов [7].

#### 4. Критерии выбора альтернативного двигателя

В качестве основных решающих факторов, влияющих на выбор альтернативных отечественных двигателей, были определены следующие требования.

1. Величина перегрузочной способности двигателя.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором общепромышленных серий имеют  $\lambda \approx 2,2 \dots 2,5$ . Этого достаточно для пуска заполненного шнека.

2. Отсутствие обслуживаемых контактных узлов.

Асинхронный двигатель не требует замены щеток и проточки коллектора. Полное исключение графитовой пыли повышает чистоту производственных помещений и позволяет отказаться от дополнительной вытяжки.

3. Локализация производства.

Приоритет был отдан российским двигателям (выбран А200М4-ИФБУЗ производства компании «Элдин» или аналоги). Это гарантирует их поставку и исключает валютные риски.

#### 5. Технико-экономическая эффективность модернизации

Внедрение асинхронного частотно-регулируемого привода позволило получить количественно измеримые результаты.

Отсутствие щеточно-коллекторного узла сократило время регламентных работ на 30 %. Исключены операции по замене щеток, продувке двигателя, проверке вытяжки. Это позволит повысить производительность на 10 % (эквивалент + 1 млн ампул/месяц).

Доля отказов, связанных с электроприводом, снизилась на 80 %. Ликвидированы остановки по причине искрения коллектора, износа щеток, ложных срабатываний защиты тиристорного преобразователя. В общем балансе аварий линии доля электропривода сократилась на 20 %. Это позволит повысить производительность на 5 % (эквивалент + 500 млн ампул/месяц).

#### Заключение

Применение российского асинхронного двигателя с преобразователем частоты, базирующееся не на простой замене компонентов, а на использовании короткозамкнутого ротора и преобразователя частоты, позволяет обеспечить технологическую гибкость перенастройки линии под новую номенклатуру изделий и одновременно снизить операционные затраты практически до нуля за счет исключения регламентных работ по замене щеток и дорогостоящих импортных тахогенераторов, повысить экологичность производства (отсутствие графитовой пыли в чистых зонах), уменьшить себестоимость готового лекарственного препарата и обеспечить стабильное выполнение государственного задания по выпуску жизненно важных лекарственных средств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мукайдех Е.А., Мукайдех А.Р.А. Импортозамещение медицинских изделий в условиях антироссийских санкций: риски и возможности // Вестник образовательного консорциума «Среднерусский университет». Серия: Экономика и управление. – 2019. – № 14. – С. 128–131.

2. **Киселева Л.Г.** Анализ возможностей импортозамещения аппаратно-технического оборудования для производства лекарств в РФ // Ростовский научный вестник. – 2023. – № 1. – С. 46–47.
3. **Губин М., Портнов В.** Комплексное автоматизированное оборудование для производства жидких стерильных лекарственных препаратов // Ремедиум. – 2004. – № 7–8. – С. 103–107.
4. Конструкция и эксплуатационные характеристики трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / Б. Гурбанов, Ш. Атаманова, Г. Комекова, М. Мередов // In Situ. – 2025. – № 12. – С. 26–28.
5. **Качалина Е.В., Беспалов В.Я.** Особенности замены двигателей постоянного тока главных механизмов ЭКГ-10 на частотно-регулируемые асинхронные двигатели // Потенциал современной науки. – 2016. – № 9 (26). – С. 8–12.
6. Оценка влияния несимметрии системы питающих напряжений на режимы работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором / И.Ф. Суворов, Д.А. Дейс, В.В. Романова, С.В. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 222–227.
7. Modeling of induction motors with a frequency converter / M.G. Persova, Yu.G. Soloveitchik, Z.S. Temlyakova, V.V. Grechkin, A.A. Temlyakov // Russian Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 96 (7). – P. 532–538. – DOI: 10.3103/S1068371225700701.

## IMPORT SUBSTITUTION OF AN EXTRUDER MOTOR FOR AN AUTOMATED ASEPTIC LIQUID FILLING LINE

**Temlyakov A.A.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

This paper discusses an engineering solution for replacing the Siemens DC motor (DC) in the extruder drive of a bottlpack automated aseptic filling line (BFS-technology) with a domestically produced squirrel-cage induction motor (ACIM). The relevance of this work stems from the need to ensure the technological sovereignty of pharmaceutical production in the face of sanctions and the lack of direct technical support from the manufacturer. To make a rational decision, the selection of components was justified, and a hardware integration scheme for the new drive with the existing line control system was developed and implemented. The modernization resulted in significant technical and economic benefits, including reduced downtime and increased line productivity. An additional benefit was the elimination of graphite dust from the brush-collector unit, improving the environmental friendliness of production in cleanrooms. The practical significance of this work lies in its role in setting a precedent for the comprehensive modernization of complex pharmaceutical equipment, which can be replicated in similar production facilities.

*Keywords:* import substitution, BFS-technology, asynchronous motor, frequency converter, extruder, pharmaceutical equipment, technological sovereignty, cleanrooms.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-65-70

## REFERENCES

1. Mukaydekh E.A., Mukaydekh A.R.A. Importozameshchenie meditsinskikh izdelii v usloviyakh antirossiiskikh sanktsii: riski i vozmozhnosti [Import substitution of medical devices under anti-russian sanctions: risks and opportunities]. *Vestnik obrazovatel'nogo konsortsiума «Srednerusskii universitet». Seriya: Ekonomika i upravlenie*, 2019, no. 14, pp. 128–131. (In Russian).

2. Kiseleva L.G. Analiz vozmozhnostei importozameshcheniya apparatno-tekhnicheskogo oborudovaniya dlya proizvodstva lekarstv v RF [Analysis of the possibilities of import substitution of hardware and technical equipment for the production of medicines in the Russian Federation]. *Rostovskii nauchnyi vestnik = Rostov Scientific Bulletin*, 2023, no. 1, pp. 46–47.
3. Gubin M., Portnov V. Kompleksnoe avtomatizirovannoe oborudovanie dlya proizvodstva zhidkikh steril'nykh lekarstvennykh preparatov [Integrated automated equipment for the production of liquid sterile drugs]. *Remedium*, 2004, no. 7–8, pp. 103–107. (In Russian).
4. Gurbanov B., Atamanova S.H., Komekova G., Meredov M. Konstruktsiya i ekspluatatsionnye kharakteristiki trekhfaznykh asinkhronnykh dvigatelei s korotkozamknutym rotorom [Design and operating characteristics of three-phase asynchronous motors with squirrel-cage rotor]. *In Situ*, 2025, no. 12, pp. 26–28. (In Russian).
5. Kachalina E.V., Bepalov V.Ya. Osobennosti zameny dvigatelei postoyannogo toka glavnykh mekhanizmov EKG-10 na chastotno-reguliruemye asinkhronnye dvigateli [Features of replacement dc motors main machinery ECG 10 to frequency-controlled asynchronous motors]. *Potentsial sovremennoi nauki = Potential of Modern Science*, 2016, no. 9 (26), pp. 8–12.
6. Suvorov I.F., Deys D.A., Romanova V.V., Khromov S.V. Otsenka vliyaniya nesimmetrii sistemy pitayushchikh napryazhenii na rezhimy raboty asinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom [The estimation of supply voltage asymmetry system influence on cage asynchronous motor mode]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2016, no. 3 (51), pp. 222–227.
7. Persova M.G., Soloveitchik Y.G., Temlyakova Z.S., Grechkin V.V., Temlyakov A.A. Modeling of induction motors with a frequency converter. *Russian Electrical Engineering*, 2025, vol. 96 (7), pp. 532–538. DOI 10.3103/S1068371225700701.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Темляков Антон Александрович** – родился в 1997 году, ассистент кафедры теоретических основ электротехники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: электромеханические преобразователи энергии. Опубликовано 24 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: a.temlyakov@corp.nstu.ru).

**Temlyakov Anton Aleksandrovich** (b. 1997) – assistant professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on Electromechanical energy converters. He is author of 24 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: a.temlyakov@corp.nstu.ru).

*Статья поступила 12 апреля 2026 г.  
Received April 12, 2026*

---

#### To Reference:

Temlyakov A.A. Importozameshchenie dvigatelya ekstrudera avtomatizirovannoi linii asepticheskogo rozлива zhidkostei [Import substitution of an extruder motor for an automated aseptic liquid filling line]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 65–70. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-65-70.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК  
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Выпуск 2 (71) апрель – июнь 2026**

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

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

---

Подписано в печать 19.06.2026. Выход в свет 25.06.2026. Бумага офсетная  
Формат 70×108 1/16. Тираж 300 экз. Уч.-изд. л. 6,3. Печ. л. 4,5. Изд. № 95. Заказ № 139  
Цена свободная

---

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





16+

Индекс журнала в Роспечати  
82961