

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТИ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНОЗЕМЬЯ

4

Том 21

ЛИПЕЦК
ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
2025

**Вести высших учебных заведений Черноземья
Научно-технический журнал**

**Том 21, № 4 (80) – декабрь 2025 г.
Основан в 2005 году**

И.о. главного редактора

канд. техн. наук, доц.
Зацепин Евгений Петрович

Ответственный секретарь

канд. техн. наук, доц.
Шачнев Олег Ярославович

Члены редакционного совета:

Сараев Павел Викторович, д-р техн. наук, доц. (Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк)
Погодаев Анатолий Кириянович, д-р техн. наук, проф. (Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк)
Бялы Витольд, д-р техн. наук, проф. (Силезский технический университет, Польша, Гливице)
Волтчев Станимир, д-р техн. наук, проф. (Лиссабонский университет, Португалия, Лиссабон)
Руомей Ли, д-р техн. наук, проф. (Китайское общество электротехники, Китай)
Краснянский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)
Лукас Вильмар Адольфович, д-р техн. наук, проф. (Берлинский технический университет, Германия, Берлин)
Найзабеков Абдрахман Батырбекович, д-р техн. наук, проф. (Рудненский индустриальный институт, Казахстан, Рудный)
Сухинин Борис Владимирович, д-р техн. наук, проф. (Тульский государственный университет, Россия, Тула)
Тимошин Сергей Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф. (Гомельский государственный технический университет, Беларусь, Гомель)
Трояновска Малгорзата, д-р техн. наук, проф. (Аграрный университет, Польша, Краков)
Моркун Владимир Станиславович, д-р техн. наук, проф. (Криворожский национальный университет, Украина, Кривой Рог)
Реза Дерахшани, д-р филос. наук (Утрехтский университет, Нидерланды, Утрехт)

Редакционная коллегия выпуска:

Электроэнергетика

Калинин В.Ф., д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)
Качанов А.Н., д-р техн. наук, проф. (Орловский государственный университет, Россия, Орел)
Шевырев Ю.В., д-р техн. наук, проф. (Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Россия, Москва)
Грачева Е.И., д-р техн. наук, проф. (Казанский государственный энергетический университет, Россия, Казань)

Автоматизация и информатика

Клюев Р.В., д-р техн. наук, проф. (Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Россия, Владикавказ)
Чернышова Т.И., д-р техн. наук, проф. (Тамбовский государственный технический университет, Россия, Тамбов)

Настоящий номер журнала подготовлен к печати Липецким государственным техническим университетом

Адрес редакции:

398055, Липецк, ул. Московская, д. 30, каб. 210.

E-mail: kaf-eo@stu.lipetsk.ru

Контактные телефоны: (4742) 32–80–48; 32–80–49

Факс: (4742) 32–80–48

УДК:621.592.3

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_3

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ЧАСТИЧНОГО СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛООБМЕННИКА-ВЫМОРАЖИВАТЕЛЯ

INCREASING THE EFFICIENCY OF A PARTIAL LIQUEFACTION PLANT FOR NATURAL GAS USING A HEAT EXCHANGER-FREEZER

©2025

Картель Илья Юрьевич¹, аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики
Картель Александр Юрьевич², кандидат технических наук, доцент кафедры
 промышленной теплоэнергетики

Губарев Василий Яковлевич³, кандидат технических наук, профессор,
 заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики

Kartel Ilya Yuryevich¹, Postgraduate student of the Department of Industrial
 Thermal Power Engineering

Kartel Alexander Yuryevich², Candidate of Technical Sciences, Associate
 Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering

Gubarev Vasily Yakovlevich³, Candidate of Technical Sciences, Professor,
 Head of the Industrial Heat Power Engineering

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: kartellip@gmail.com

E-mail: kartel_ayu@stu.lipetsk.ru

E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8585-9247>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5435-0212>³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6690-3355>

Аннотация: В статье рассмотрена установка частичного сжижения природного газа, работающая по циклу Клода, модернизированная за счёт установки теплообменника-вымораживателя перед блоком адсорбционной осушки. Проведено термодинамическое моделирование для чистого метана. Доказано, что установка теплообменника-вымораживателя обеспечивает предварительное охлаждение природного газа с последующей конденсацией водяных паров до стадии адсорбционной осушки. Это позволяет частично удалить влагу, уменьшив тем самым нагрузку на блок осушки, что в свою очередь позволит уменьшить размеры самого блока и сократить количество тепла, необходимого для регенерации сорбента. Результаты исследования подтверждают возможность снижения капитальных и эксплуатационных затрат и повышения общей термодинамической эффективности цикла частичного сжижения природного газа.

Ключевые слова: частичное сжижение природного газа; цикл Клода; теплообменник-вымораживатель; осушка газа; термодинамическое моделирование; рекуперация холода; энергетическая эффективность.

Для цитирования: Картель, И.Ю. Повышение эффективности установки частичного сжижения природного газа при использовании теплообменника-вымораживателя / И.Ю. Картель, А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 3–13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_3.

Abstract: The paper examines a partial natural gas liquefaction unit operating on the Claude cycle and modified by introducing a pre-drying freeze-out heat exchanger installed upstream of the adsorption dehydration block. Thermodynamic modeling was performed for pure methane. It is demonstrated that the incorporation of the freeze-out heat exchanger ensures preliminary cooling of the natural gas with subsequent condensation of water vapor prior to the adsorption stage. This enables partial moisture removal, thereby reducing the load on the dehydration block, which in turn allows decreasing its size and lowering the heat required for sorbent regeneration. The results confirm the potential for reducing both capital and operating costs and for improving the overall thermodynamic efficiency of the partial liquefaction cycle.

Keywords: partial natural gas liquefaction; Claude cycle; freeze-out heat exchanger; gas dehydration; thermodynamic modeling; cold energy recuperation; energy efficiency.

For citation: Kartel I.Yu. Increasing the efficiency of a partial liquefaction plant for natural gas using a heat exchanger-freezer / I.Yu. Kartel, A.Yu. Kartel, V.Ya. Gubarev // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 3–13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_3.

ВВЕДЕНИЕ

Сжижение природного газа (СПГ) остаётся одним из наиболее эффективных способов транспортировки и хранения углеводородов, особенно в условиях отсутствия развитой трубопроводной инфраструктуры. В мировой практике технологии СПГ активно применяются как для магистральных поставок, так и для локального газоснабжения, включая удалённые районы, промышленные предприятия и объекты транспорта. Развитие малотоннажного и частичного сжижения газа в последние годы получило особое внимание в связи с задачами диверсификации топливных источников и увеличения гибкости энергосистем.

В России формируется собственная научно-техническая база в области технологий сжижения природного газа, ориентированная на создание энергоэффективных и адаптированных к климатическим условиям решений. Активное развитие малотоннажных установок СПГ связано с необходимостью обеспечения удалённых территорий, в частности для освоения Арктики, а также автономных энергетических комплексов. При этом особое значение приобретают технологические схемы, сочетающие высокую эффективность охлаждения и простоту реализации, что позволяет снижать капитальные и эксплуатационные затраты при сохранении надёжности работы оборудования.

Одной из ключевых технологических проблем при подготовке природного газа к

сжижению является необходимость удаления влаги и диоксида углерода (CO_2). При температурах ниже -60°C влага и CO_2 кристаллизуются, что может приводить к образованию кристаллогидрат и последующему засорению трубопроводов, нарушению работы оборудования и аварийным ситуациям. Поэтому осушка газа до точки росы ниже температуры начала сжижения является обязательным этапом всех промышленных схем. На практике применяются различные методы осушки и охлаждения, включая многоступенчатые теплообменные аппараты, адсорбционные колонны и циклы с турбодетандерными агрегатами [1,11–15]. Однако такие системы нередко отличаются высокой стоимостью, значительными габаритами и повышенными требованиями к эксплуатации.

В рамках данной работы рассматривается принципиальная схема установки частичного сжижения природного газа, описанная в патенте [1]. Указанная схема содержит функциональные элементы для осушки, охлаждения и детандерного расширения потока природного газа. В процессе изучения данной схемы и последующего моделирования было выявлено, что для эффективного удаления избытка влаги в блоки осушки необходимы большие капитальные и эксплуатационные затраты. В связи с чем было разработано альтернативное решение, позволяющее снизить затраты и повысить эффективность блока осушки путём установки теплообменника-вымораживателя.

Целью настоящего исследования является сравнение исходной схемы (рис. 1) с предложенной модификацией (рис. 2), включающей дополнительный теплообменник-вымораживатель и перераспределение потоков, обеспечивающее более глубокое охлаждение газа до его поступления в блок осушки. В работе приведены термодинамическое обоснование решения, анализ условий эксплуатации, а также оценка влияния предложенной конфигурации на эффективность подготовки газа к сжижению.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

В качестве исходного объекта исследования рассматривается принципиальная схема установки частичного сжижения природного газа, описанная в патенте [1] и представленная на рис. 1. Данная установка предназначена для поэтапного охлаждения и частичного сжижения природного газа с предварительной осушкой и очисткой от диоксида углерода.

Схема включает блок очистки газа, адсорбционную систему для осушки, теплообменные аппараты для последовательного охлаждения потока, турбодетандерный агрегат и сепарационные ёмкости для выделения жидкой фракции. Работа установки основана на классическом термодинамическом цикле, в котором используется энергия расширения газа для получения холода и снижения температуры потока до условий, близких к сжижению.

Анализ схемы показал, что последовательное охлаждение и осушка газа позволяют обеспечить стабильную работу установки, однако эффективность осушения в значительной степени определяется температурой и влагосодержанием газа на входе в адсорбционный блок. Эти параметры могут варьироваться согласно [2], и тем самым при поступлении газа с температурой выше 0 °С и повышенным влагосодержанием нагрузка на осушающие элементы существенно возрастает. Это требует увеличения массы сорбента, усложнения системы регенерации и, как следствие, роста капитальных и эксплуатационных затрат.

Таким образом, исходная принципиальная схема (рис. 1) обеспечивает частичное

сжижение природного газа с заданными технологическими параметрами, однако высокая энергозатратность на стадии осушки даёт возможность для альтернативного решения, позволяющего сократить нагрузку на этот блок путём установки теплообменника-вымораживателя (рис. 2), который обеспечивает предварительное охлаждение поступающего в установку потока газа и частичную конденсацию водяных паров ещё до блока осушки.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Для снижения энергозатрат на стадии осушки и повышения её эффективности предложены следующие изменения исходной схемы (рис. 1): установка теплообменника-вымораживателя (15) перед блоком осушки (2) и изменение схемы взаимодействия потоков в теплообменных аппаратах, направленное на сохранение холода возвращаемого потока для последующего использования в теплообменнике-вымораживателе.

В предлагаемой схеме (рис. 2) входной магистральный газ сначала проходит через теплообменник-вымораживатель (15), где за счёт охлаждения возвращаемым потоком обеспечивается частичная конденсация влаги, что позволяет уменьшить влагосодержание газа перед осушкой. Следующее отличие предлагаемой схемы заключается в том, что газ после сжатия в компрессорной части охлаждается в охладителе (7) внешним потоком из магистрали (16), а не за счёт прогрева возвращаемого потока. Благодаря этому возвращаемый поток, прошедший через теплообменные аппараты $9 \rightarrow 8 \rightarrow 15$, подходит к (15) при более низкой температуре, что обеспечивает требуемый температурный напор для вымораживания влаги в теплообменнике-вымораживателе.

Расчётная оценка показывает, что дополнительное охлаждение поступающего потока газа на 10–15 °С в теплообменнике-вымораживателе приводит к снижению влагосодержания до двух раз, что уменьшает количество сорбента и размеры всего адсорбционного блока. Кроме того, снижается количество тепла, необходимого для регенерации.

нерации сорбента. Внесённое изменение не меняет принцип работы детандерного контура и не требует введения внешнего хладагента в основной цикл сжижения: внешний поток (16) используется точно в охладителе (7) для разгрузки возвращаемого потока по теплу. Так же поток (16) может использоваться для собственных нужд, так как после выхода из охладителя (7) его температура может достигать 40–60 °С.

Результаты анализа показали, что использование теплообменника-вымораживателя не приводит к существенному усложнению конструкции установки и может быть реализовано в существующих технологических линиях. Это делает решение практически применимым для промышленных установок малотоннажного и частичного сжижения природного газа, обеспечивая повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат.

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Работа установки частичного сжижения природного газа основана на термодинамическом цикле Клода, в котором используется энергия расширения газа в детандере для получения холода и последовательного охлаждения основного потока. В классической конфигурации цикла детандерный поток после расширения направляется на теплообмен, где он охлаждает поступающий природный газ до температур, близких к точке начала сжижения.

В предлагаемом решении ключевым дополнением цикла является установка теплообменника-вымораживателя. Это позволяет реализовать предварительное охлаждение поступающего газа ещё до стадии адсорбционной осушки, используя низкопотенциальный холод возвращаемого потока без увеличения энергозатрат. Таким образом, достигается более полное использование энтальпийного потенциала обратного потока при сохранении энергетического баланса цикла.

Моделирование показало, что при температуре поступающего в установку газа 10 °С и давлении 40 атм, после компрессии до 90 атм и последующего детандерного расши-

рения до 18 атм, температура потока в нижней точке цикла достигает порядка –100 °С. В результате в контуре возвращаемого потока формируется стабильный источник холода, достаточный для эффективного охлаждения входного газа в теплообменнике-вымораживателе.

Эффективность работы теплообменника-вымораживателя определяется температурным перепадом между прямым и обратным потоками: чем ниже температура возвращаемого газа, тем выше степень предварительного охлаждения поступающего потока. Расчёты показывают, что при температуре возвращаемого потока порядка –30 °С обеспечивается необходимый тепловой напор (около 15 °С), достаточный для эффективного охлаждения поступающего природного газа с 10 °С до –15 °С. Такое охлаждение позволяет снизить влагосодержание газа более чем в два раза, что значительно снижает нагрузку на адсорбционный блок и уменьшает энергозатраты на его регенерацию.

С термодинамической точки зрения, введение дополнительного теплообменного звена приводит к увеличению степени рекуперации холода без нарушения энергетического равновесия цикла. Энергетические потери при этом минимальны, поскольку процесс осуществляется в рамках существующего диапазона температуры и давления, характерного для цикла Клода. Расчётные данные показывают согласованность всех термодинамических параметров, что подтверждает устойчивость работы установки в выбранных режимах.

Таким образом, предложенная модификация обеспечивает рациональное использование внутреннего холода установки, улучшает термодинамические параметры подготовки газа и повышает общую эффективность цикла частичного сжижения без необходимости применения внешних холодильных контуров.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 представлена исходная схема установки частичного сжижения природного газа согласно [1]. В данной схеме используется традиционный цикл Клода с компрессором, теплообменными устройствами

и турбодетандером, обеспечивающим охлаждение газа до температуры частичного сжижения. В установке реализуется последовательное охлаждение потока, его сжатие и расширение, однако отсутствует предва-

рительная подготовка газа до поступления в блок адсорбционной осушки, что приводит к увеличению энергоёмкости и габаритов осушающего узла.

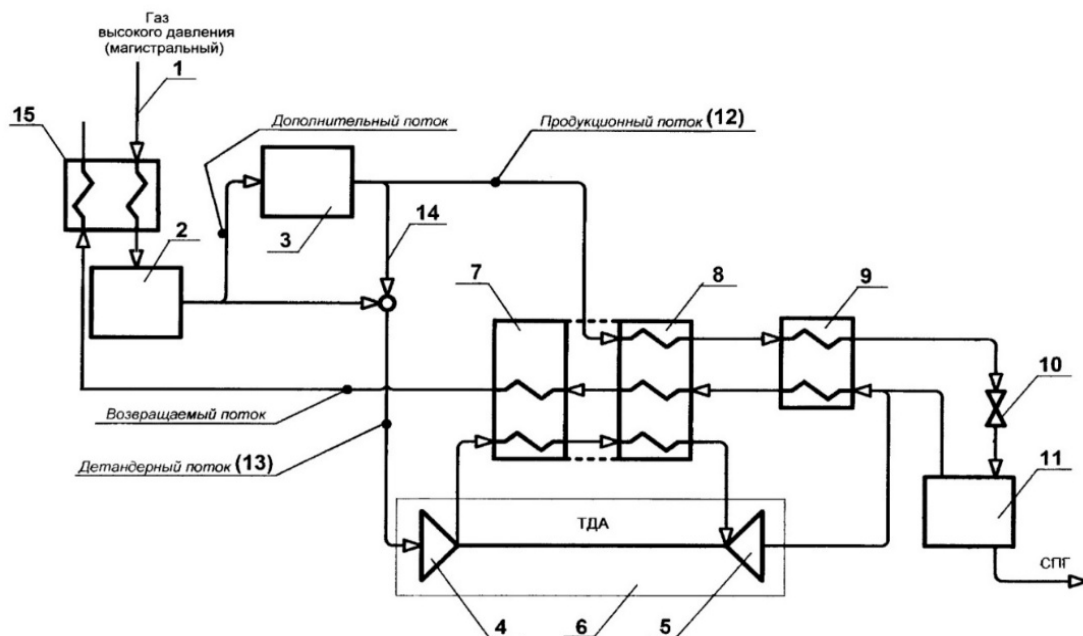


Рис. 1. Исходная принципиальная схема установки
Fig.1. Initial schematic diagram of the installation

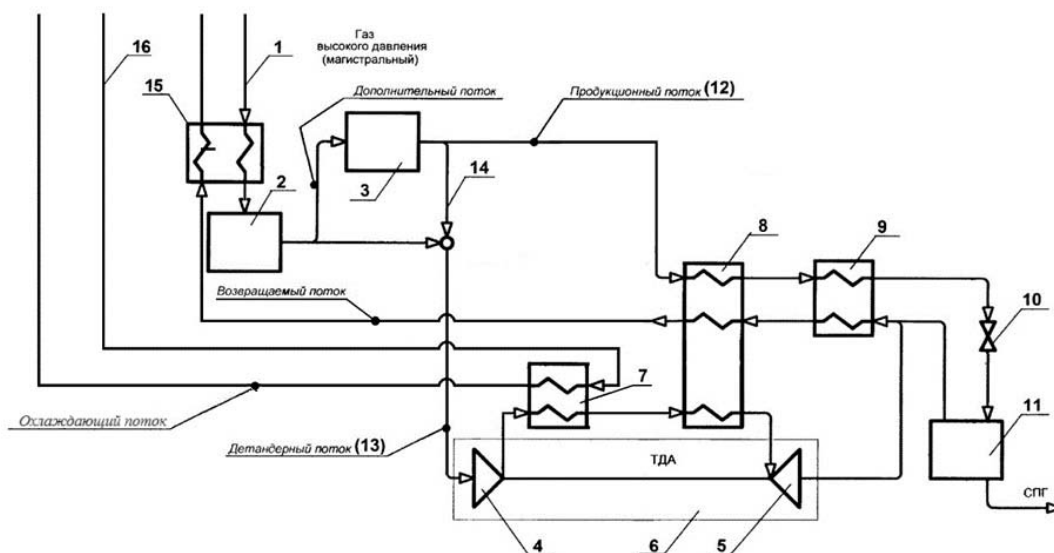


Рис. 2. Предложенная принципиальная схема установки
с теплообменником-вымораживателем
Fig. 2. The proposed schematic diagram of the installation with a heat exchanger-freezer

На рис. 2 представлена предложенная схема, отличающаяся установкой дополнительного теплообменника-вымораживателя в трубопровод подачи газа. Его установка позволяет использовать низкопотенциальный холод возвращаемого потока для предварительного охлаждения поступающего природного газа до стадии адсорбции, что приводит к частичной конденсации водяных паров и уменьшению влагосодержания газа. Тем самым снижается нагрузка на адсорбционный блок и уменьшается потребность в тепле на регенерацию сорбента, сохраняя при этом общую энергетическую целостность цикла. Работа установки моделировалась в координатах h - $\log P$ для чистого метана на основе цикла Клода с дополнительными теплообменными звеньями. Процессы в теплообменниках рассматривались как идеальные — без учёта тепловых потерь и гидравлического сопротивления, что позволило оценить внутреннюю энергоэффективность и баланс температурных уровней. Диаграмма приведена на рис. 3.

Последовательность процессов в установке:

- 1–2 — охлаждение входящего потока газа в теплообменнике-вымораживателе;
- 2–3 — сжатие в компрессорной ступени турбодетандера;
- 3–4 — охлаждение после компрессора во

внешнем охладителе;

4–5 — охлаждение в предварительном теплообменнике;

5–6 — расширение в детандере (температура -100°C);

6–7 — нагрев в основном теплообменнике (до -87°C);

7–8 — нагрев в предварительном теплообменнике (до -30°C);

8–9 — нагрев в теплообменнике-вымораживателе и возврат на вход установки (до -4°C).

Продукционный поток составляет 15 % от общего объема газа, поступающего в установку. После детандерного расширения до 18 атм температура потока снижается до -100°C , что создаёт достаточный холодильный потенциал для всего теплообменного процесса. На входе в теплообменник-вымораживатель возвращаемый поток имеет температуру около -30°C , что обеспечивает температурный напор порядка 15°C относительно входящего газа (10°C) и охлаждение его до -15°C . Такое понижение температуры позволяет снизить влагосодержание природного газа более чем в два раза (при $P = 4$ МПа и $T = 10^{\circ}\text{C}$ влагосодержание уменьшается с 82 до около 40 мг/кг), что в свою очередь сокращает объём сорбента и уменьшает потребность в тепле для его регенерации.

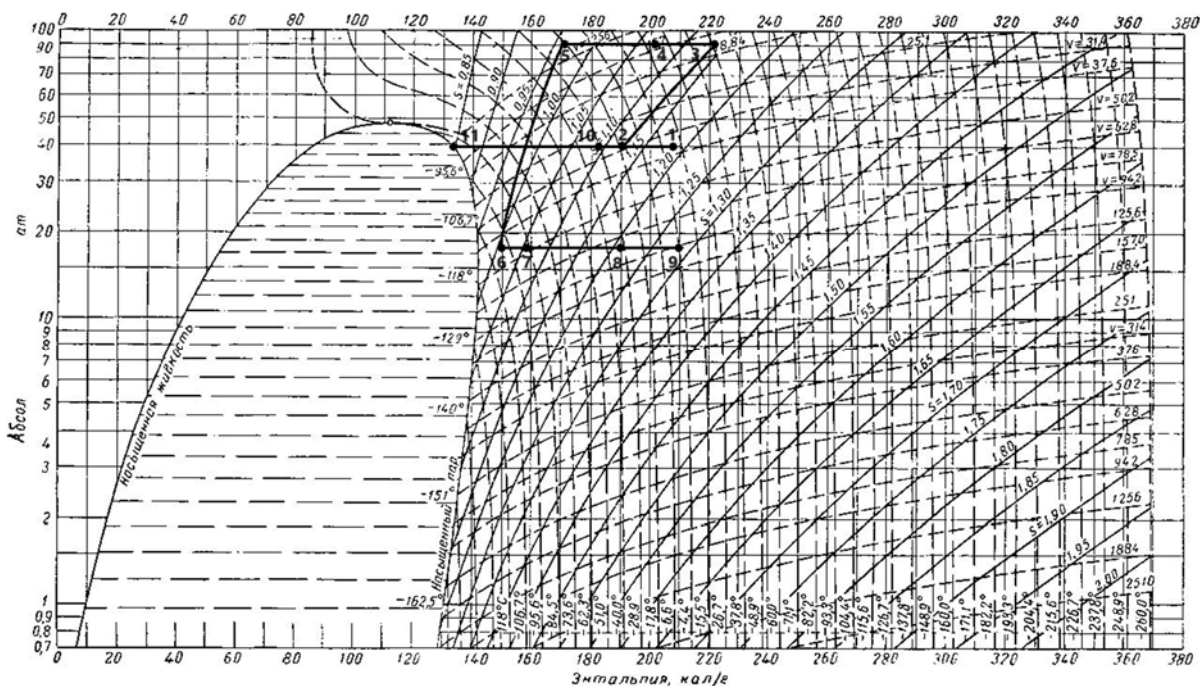


Рис. 3. Термодинамический цикл установки в h - $\log P$ диаграмме
Fig. 3. Thermodynamic cycle of the plant in h - $\log P$ diagram

Параметры потоков газа по точкам цикла

Table 1

Gas flow parameters at cycle points

№ точки	Место протекания процесса	Давление, атм	Температура, °C	Краткое описание
1	Вход газа	40	10	Исходный природный газ
2	После охлаждения в ТО-вымораживателе	40	-15	Предварительное охлаждение
3	После компрессора	90	50	Сжатие
4	После внешнего охладителя	90	20	Охлаждение после сжатия
5	После предварительного ТО	90	-18	Охлаждение перед детандером
6	После детандера	18	-100	Получение низкопотенциального холода
7	После основного ТО	18	-87	Рекуперация холода
8	После предварительного ТО	18	-30	Окончание рекуперации
9	После ТО-вымораживателя	18	-4	Возврат на вход установки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ показал, что установка теплообменника-вымораживателя позволяет эффективно использовать внутренний холод цикла и повысить энтальпийную эффективность установки. Дополнительное теплообменное звено не приводит к существенным энергетическим потерям, поскольку функционирует в пределах существующего диапазона температуры и давления цикла Клода.

Таким образом, моделирование подтвердило, что установка с теплообменником-вымораживателем обеспечивает устойчивую работу цикла при существенном снижении энергозатрат на подготовку природного газа и повышении общей эффективности процесса частичного сжижения.

Моделирование показало, что использование теплообменника-вымораживателя в схеме установки частичного сжижения природного газа обеспечивает более эффективное использование внутреннего холода цикла и позволяет значительно снизить энергозатраты на осушку. Полученные результаты

подтвердили возможность стабильной работы установки при заданных параметрах без необходимости применения внешних холодильных контуров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ и термодинамическое моделирование установки частичного сжижения природного газа показали, что установка теплообменника-вымораживателя в схему цикла Клода позволяет значительно повысить эффективность процесса подготовки газа за счёт более рационального использования внутреннего холода. Предварительное охлаждение потока до блока адсорбционной осушки обеспечивает частичное удаление влаги на стадии вымораживания, что снижает влагосодержание поступающего в установку газа более чем в два раза и сокращает тепловые затраты на регенерацию сорбента.

Результаты моделирования подтверждают, что предложенная схема сохраняет устойчивость термодинамического цикла при параметрах: давление на входе 40 атм,

температура 10 °С, давление после компрессора 90 атм и температура после детандерного расширения –100 °С. Полученный температурный профиль потоков (от –100 до –30 °С в зоне рекуперации) обеспечивает достаточный тепловой напор для эффективного охлаждения без необходимости применения внешних холодильных контуров.

Предложенная установка демонстрирует потенциал для дальнейшего совершенствования. Перспективными направлениями исследований являются:

- оптимизация степени расширения в детандере и давления в компрессорной ступени для повышения холодопроизводительности;
- уточнение характеристик цикла при работе с природным газом реального состава, содержащим этан, азот и углекислый газ;
- оптимизация компоновки теплообменников и внедрение автоматизированной системы регулирования потоков;
- оценка возможности интеграции установки в состав малотоннажных комплексов СПГ и проведения технико-экономического анализа эффективности модернизированной схемы.

Таким образом, разработанная установка обеспечивает энергетически эффективное решение задачи частичного сжижения природного газа и может служить основой для создания перспективных систем подготовки газа к транспортировке и хранению, особенно в условиях автономных или удалённых объектов газовой инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU 187598 U1 Российская Федерация. Установка частичного сжижения природного газа. F25J 1/0022 (2018.08), МПК F25J 1/02 : № RU2017144255U : заявл. 18.12.2017 ; опубл. бюл. № 8 от 13.03.2019 / Краковский Б.Д., Паркин А.Н., Попов О.М., Сычков А.Е., Удуд В.Н. ; правообладатель ОАО НПО Гелыймаш.
2. СТО Газпром 089.2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. Изд. официальное / утвержден и введен в действие распоряжением ОАО Газпром 25 октября 2010, № 359 ; взамен ОСТ 51.40-93. Москва : Газпром, 2010. 4 с.
3. Картель И.Ю., Губарев В.Я., Картель А.Ю. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции. Липецк, 2024. С. 106-110.
4. Картель И.Ю., Губарев В.Я., Картель А.Ю. Модернизация схемы установки частичного сжижения природного газа с теплообменником-вымораживателем // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината. Казань, 2024. С. 166-171.
5. Картель И.Ю., Картель А.Ю. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя // Тенденции развития современной науки : сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2023. С. 1098-1102.
6. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя / Губарев В.Я., Картель А.Ю., Картель И.Ю., Шацких Н.А. // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции. Липецк, 2023. С. 38-42.

7. Анализ эффективности различных схем ожижителей природного - газа / А.К. Грезин, Г.И. Бумагин, Ю.И. Ландаи [и др.] // Сборник научных трудов Сибирского регионального отделения МАХ. Криогенное оборудование и криогенные технологии. Вып. I. 4.I. Омск, 1997.
8. Мутовин Ю.Г. Покрытие пиковых неравномерностей газопотребления сжиженным природным газом и исследование технологических процессом его производства : специальность 05.15.13 "Нефтегазопроводы, базы и хранилища" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Ю.Г. Мутовин ; ВНИИ природных газов. Москва : ВНИИГАЗ, 1988. 20 с.
9. Кириллов Н.Г. Сжиженный природный газ: области применения и технологии производства // Холодильный бизнес. 2002.
10. Саркисян В.А. Экономические проблемы газификации и использования СПГ // АвтоГазоЗаправочный Комплекс. 2002.
11. Патент RU 2212598 C1 Российская Федерация. Способ частичного сжижения природного газа и устройство для его осуществления. МПК F25J 1/00 : опубл. 20.09.2003 / Горбачев С.П.
12. Патент RU 2272971 C2 Российская Федерация. Установка частичного сжижения природного газа. МПК F25J 1/00 : № 2004112285/06 : заявл. 23.04.2004 : опубл. Бюл. № 9 27.03.2006 / Краковский Б.Д., Мартынов В.А., Попов О.М., Русинов Д.А., Удут В.Н. ; заявитель НПО Гелиймаш.
13. Патент RU 2538192 C1 Российская Федерация. Способ сжижения природного газа и установка для его осуществления. МПК F25J 1/00 : № 20131490/06 : заявл. 07.11.2013 : опубл. Бюл. № 1 10.01.2015 / Мамаев А.В., Сиротин С.А., Копша Д.П., Бахметьев А.П., Ишмурзин А.В., Лебедев Ю.В., Новиков Д.В., Афанасьев И.П., Ходаковский В.А. ; правообладатель: ОАО Газпром.
14. Патент RU 2645095 C1 Российская Федерация. Способ частичного сжижения природного газа (варианты). СПК F25J 1/0022 (2006.01), F25J 1/0035 (2006.01), F25J 3/0214 (2006.01) : № 2017111174 : заявл. 03.04.2017 : опубл. Бюл. № 5 20.08.2014 / Горбачев С.П., Медведков И.С. ; патентообладатель НИИ ВНИИ-Газ.
15. Патент RU 2753206 C1 Российская Федерация. Способ автономного производства сжиженного природного газа. СПК F25J 1/0022 (2021.05) : № 2021101588 : заявл. 26.01.2021 : опубл. Бюл. № 23 12.08.2021 / Белоусов Ю.В. ; патентообладатель Белоусов Ю.В.
16. Горбачев С.П., Медведков И.С. Частичное сжижение природного газа в малотоннажных установках с блоком низкотемпературной очистки //Транспорт на альтернативном топливе 2013. № 2 (32). С. 48-51.
17. Barron R.F. Cryogenic Systems. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press, 1985.
18. Venkatarathnam V. Cryogenic Mixed Refrigerant Processes. Cham : Springer, 2008.
19. Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. Fundamentals of Natural Gas Processing. 3rd ed. Boca Raton (USA) : CRC Press, 2019.
20. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes / J. Zhang , H. Meerman, R. Benders, A. Faaij. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114736 // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 174. P. 115292.

REFERENCES

1. Patent RU 187598 U1 Russian Federation. Partial liquefaction unit for natural gas. IPC F25J 1/0022 (2018.08), F25J 1/02 : № RU2017144255U : declared 18.12.2017 ; published the bulletin № 8 13.03.2019 / Krakovsky B.D., Parkin A.N., Popov O.M., Sychkov A.E., Udut V.N. ; copyright holder : NPO Geliymash JSC.

2. STO Gazprom 089.2010. Flammable natural gas supplied and transported via main gas pipelines. Technical conditions. Official edition / approved and put into effect by order of OAO Gazprom dated October 25, 2010, No. 359; replacing OST 51.40-93. Moscow: Gazprom, 2010. 4 p.
3. Kartel I.Yu., Gubarev V.Ya., Kartel A.Yu. Efficiency Analysis of a Natural Gas Liquefaction System with a Freezing Heat Exchanger // Nano-biotechnologies. Thermal Power Engineering. Mathematical Modeling. Collection of papers from the international scientific and practical conference. Lipetsk, 2024. P. 106-110.
4. Kartel I.Yu., Gubarev V.Ya., Kartel A.Yu. Modernization of a Partial Natural Gas Liquefaction System with a Freezing Heat Exchanger // Problems of Modern Thermal Power Engineering. Collection of papers from the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Industrial Thermal Power Engineering specialty at LGTU, the 70th anniversary of the Lipetsk Region, and the 90th anniversary of the Novolipetsk Iron and Steel Works. Kazan, 2024. P. 166-171.
5. Kartel I.Yu., Kartel A.Yu. Analysis of the efficiency of the natural gas liquefaction circuit with the installation of a heat exchanger-freezer // Trends in the development of modern science. Collection of papers of the scientific and practical conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University. Lipetsk, 2023. P. 1098-1102.
6. Analysis of the efficiency of the natural gas liquefaction circuit with the installation of a heat exchanger-freezer / V.Ya. Gubarev, A.Yu. Kartel, I.Yu. Kartel, N.A. Shatskikh // Nano-bio-technologies. Heat power engineering. Mathematical modeling. Collection of articles of the international scientific and practical conference. Lipetsk, 2023. P. 38-42.
7. Analysis of the efficiency of various natural gas liquefiers / A.K. Grezin, G.I. Bumagin, Yu.I. Landai [et al.] // Coll. studies, tr. Siberian regional department of MAH. Cryogenic equipment and cryogenic technologies. Issue I. 4.I. - Omsk, 1997.
8. Mutovin Yu.G. Covering peak unevennesses of gas consumption by liquefied natural gas and study of technological processes of such and large numbers of people: Aistorsf. leaflet of candidate of technical sciences. Moscow : VNIIGAZ, 1988. 20 p.
9. Kirillov N.G. Liquefied natural gas: areas of application and production technologies // Refrigeration business. 2002.
10. Sargsyan V.A. Economic problems of gasification and use of LNG // AvtoGaz-Zapravochny Complex. 2002.
11. Patent RU 2212598 C1 Russian Federation. Method for partial liquefaction of natural gas and device for its implementation МПК F25J 1/00 : published 20.09.2003 / Gorbachev S.P
12. Patent RU 2272971 C2 Russian Federation. Installation for partial liquefaction of natural gas. МПК F25J 1/00 : № 2004112285/06 : declared 23.04.2004 : published the bulletin № 9 27.03.2006 / Krakovsky B.D., Martynov V.A., Popov O.M., Rusinov D.A., Udut V.N.
13. Patent RU 2538192 C1 Russian Federation. Method for liquefaction of natural gas and device for its implementation. МПК F25J 1/00 : № 20131490/06 : declared. 07.11.2013 : published the bulletin № 1 10.01.2015 / Mamaev A.V., Sirotin S.A., Kopsha D.P., Bakhmetyev A.P., Ishmurzin A.V., Lebedev Yu.V., Novikov D.V., Afanasyev I.P., Khodakovskiy V.A.; copyright holder: OAO Gazprom.
14. Patent RU 2645095 C1 Russian Federation. Method for partial liquefaction of natural gas (variants). СПК F25J 1/0022 (2006.01), F25J 1/0035 (2006.01), F25J 3/0214 (2006.01) : № 2017111174 : declared 03.04.2017 : published the bulletin № 5 20.08.2014 / Gorbachev S.P., Medvedkov I.S.
15. Patent RU 2753206 C1 Russian Federation. Method for autonomous production of liquefied natural gas. СПК F25J 1/0022 (2021.05) : № 2021101588 : declared

- 26.01.2021 : published the bulletin № 23
12.08.2021 / Belousov Yu.V.
16. Gorbachev S.P., Medvedkov I.S. Partial liquefaction of natural gas in small-tonnage units with a low-temperature cleaning unit // *Alternative Fuel Transport* 2013. No. 2 (32). P. 48-51.
17. Barron R.F. *Cryogenic Systems*. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press, 1985.
18. Venkatarathnam V. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*. Cham : Springer, 2008.
19. Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. *Fundamentals of Natural Gas Processing*. 3rd ed. Boca Raton (USA) : CRC Press, 2019.
20. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes / J. Zhang , H. Meerman, R. Benders, A. Faaij. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114736 // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 174. P. 115292.

УДК 621.31

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_14

**МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА, ПОДАВЛЯЮЩЕГО
КОЛЕБАНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ
С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЗАДАНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ**

**A TECHNIQUE FOR AUTOMATICALLY CALCULATING
THE PARAMETERS OF A CORRECTION DEVICE THAT SUPPRESSES
FLUCTUATIONS IN ELECTRIC DRIVE SYSTEMS WHILE ENSURING
THE SPECIFIED QUALITY INDICATORS OF TRANSIENTS**

©2025

Мещеряков Виктор Николаевич¹, доктор технических наук,
заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и робототехники

Языкова Любовь Николаевна², старший преподаватель кафедры
автоматизированного электропривода и робототехники

Сысоев Роман Алексеевич, магистрант кафедры автоматизированного
электропривода и робототехники

Музылева Инна Васильевна³, кандидат технических наук, доцент кафедры
автоматизированного электропривода и робототехники

Терновских Глеб Андреевич, аспирант кафедры автоматизированного
электропривода и робототехники

Meshcheryakov Victor Nikolaevich¹, Doctor of Technical Sciences, (Grand PhD),
Professor, head of the Department of Automated Electric Drive and Robotics

Yazykova Lyubov Nikolaevna², Senior Lecturer at the Department of Automated
Electric Drive and Robotics

Sysoev Roman Alekseevich, Master of the Department of Automated Electric Drive
and Robotics

Muzyleva Inna Vasilyevna³, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate
Professor of the Department of Automated Electric Drive and Robotics

Ternovskikh Gleb Andreevich, Graduate student of the Department of Automated
Electric Drive and Robotics

*Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)*

E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru

E-mail: yaln29@yandex.ru

E-mail: susoevroman682@mail.ru

E-mail: lstu-miv2010@yandex.ru

E-mail: gternovskih@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6035-5263>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5958-5144>

Аннотация: Для многих технических систем характерны колебательные переходные процессы. Поэтому разработка методов подавления колебаний с помощью корректирующих средств является актуальной задачей. Целью исследования является синтез корректирующего устройства, выполненного на основе реального дифференцирующего звена, включенного в канал отрицательной связи, охватывающей колебательное звено, которое описывает, например, систему «идеальный источник тока – асинхронный двигатель». Выполненные аналитические исследования и численные эксперименты, основанные на методе ступенчатого спуска, показали возможность подавления колебаний в системе второго порядка путем введения гибкой коррекции с обеспечением требуемого качества переходного процесса.

Ключевые слова: гибкая обратная связь, подавление колебаний, звено второго порядка, качество переходного процесса, корректирующее устройство.

Для цитирования: Методика автоматического расчета параметров корректирующего устройства, подавляющего колебания в электроприводных системах с обеспечением заданных показателей качества переходных процессов / В.Н. Мещеряков, Л.Н. Языкова, Р.А. Сысоев, И.В. Музылева, Г.А. Терновских // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 14–23. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_14.

Abstract: Many technical systems are characterized by oscillatory transients. Therefore, the development of methods for suppressing fluctuations using corrective means is an urgent task. The aim of the study is to synthesize a correction device based on a real differentiating link, which includes a negative communication channel covering an oscillatory link, which describes, for example, the system "ideal current source–asynchronous motor". The performed analytical studies and numerical experiments based on the step descent method have shown the possibility of suppressing vibrations in a second-order system by introducing a flexible correction to ensure the required quality of the transient process.

Keywords: flexible feedback, oscillation suppression, second-order link, quality of the transient process, correcting device.

For citation: A method for automatically calculating the parameters of a corrective device that suppresses vibration in electrical water systems, ensuring the specified quality indicators of transients / V.N. Meshcheryakov, L.N. Yazykova, R.A. Sysoev, I.V. Muzyleva, G.A. Ternovskikh // Vests of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 14–23. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_14.

ВВЕДЕНИЕ

Колебательные процессы характерны для электрических и упруго связанных электромеханических систем, а также маятников, систем перемещения гибко подвешенного груза. Моделью большого количества колебательных объектов с достаточной степенью точности является динамическое звено второго порядка. Большое количество моделей электромеханических преобразователей также включает в себя колебательные звенья второго порядка [1, 2]. Существуют различные методы подавления колебаний при переходных процессах: ПИД-регулирование [3], нечёткая логика [4, 5], применение shaping-алгоритмов [6]. Поскольку колебания переменных системы в переходных процессах приводит к излишним энергозатратам и снижению времени нормального

функционирования системы, проблема нахождения способов подавления колебаний остаётся актуальной [7–10].

Задачей предлагаемого исследования является синтез корректирующего устройства, параметры которого обеспечат оптимизацию колебательного переходного процесса. В качестве объекта исследования выбрано динамическое звено второго порядка.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Динамические системы и объекты могут быть описаны дифференциальными и характеристическими уравнениями, а также передаточной функцией, устанавливающей связь между входным и выходным сигналами. При введении соответствующих допущений математическая модель электромеханического объекта может быть представлена ко-

лебательным звеном второго порядка. Типичным примером колебательного звена второго порядка является асинхронный двигатель в случае его питания от идеального источника тока. В такой системе представленное в операторной форме динамическое уравнение, связывающее момент и квадрат тока статора асинхронного двигателя, имеет следующий вид [11]:

$$M(p) = \frac{3p_n}{2} \frac{L_m^2}{L_2'} \frac{I_1^2(p)}{\left(\frac{S_{KT}}{S_\alpha}\right) (T_{ЭТ}p + 1)^2 + \frac{S_\alpha}{S_{KT}}},$$

где p_n – число пар полюсов; L_m – индуктивность контура намагничивания; L_2' – приведенная индуктивность ротора;

$$S_{KT} = \frac{1}{T_{ЭТ}\omega_1} = \frac{S_\alpha}{T_{ЭТ}\Delta\omega_{ЭЛ}} - \text{критическое}$$

скольжение; $T_{ЭТ}$ – постоянная времени ротора обмотки; S_α – относительное скольжение при частотном управлении.

Передаточная функция типового звена 2-го порядка с затухающими колебаниями имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}, \quad (1)$$

где T – постоянная времени; ξ – коэффициент затухания колебаний.

Звено второго порядка является колебательным при $0 < \xi < 1$.

Звено второго порядка можно также в общем виде описать передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – коэффициенты характеристического многочлена.

Рассматривая совместно уравнения (2) и (3) можно получить выражение, связывающее коэффициент затухания ξ с коэффициентами T_1 и T_2 .

$$\xi = \frac{T_2}{2T_1}. \quad (3)$$

Динамические свойства звеньев и систем могут быть изменены за счет корректирующих средств, реализующих охват исходного звена гибкой отрицательной обратной связью с передаточной функцией $W_{КУ}(p)$ (рис. 1). В состав гибкого корректирующего устройства должно входить дифференцирующее звено [12–14].

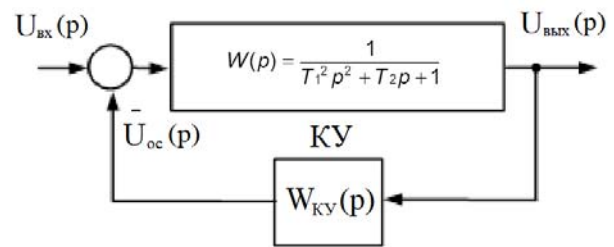


Рис.1. Структурная схема системы «колебательное звено – корректирующее устройство»

Fig.1. Structural diagram of the «oscillating link – correction device» system

В качестве корректирующего устройства в данном исследовании принято реальное дифференцирующее устройство с инерцией, реализованное на базе пропорционального и интегрального звеньев, соединенных в соответствии со схемой, показанной на рис. 2.

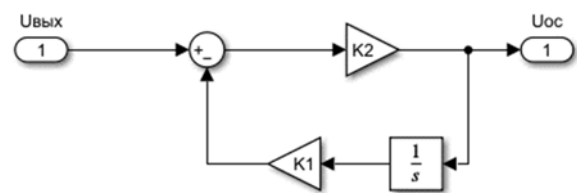


Рис. 2. Корректирующее устройство на основе реального дифференцирующего звена

Fig. 2. Correction device based on a real differentiating link

Передаточная функция такого корректирующего устройства имеет следующий вид:

$$W_{КУ}(p) = \frac{k_2 p}{k_1 k_2 + p} = \frac{\frac{1}{k_1} p}{\frac{1}{k_1 k_2} p + 1}. \quad (4)$$

Корректирующее устройство реализовано как усилительное звено, охваченное отрицательной обратной связью с интегратором, представляет собой реальное дифференцирующее звено [12] с коэффициентом усиления $k_{oc} = \frac{1}{k_1}$ и постоянной времени

$$T_{oc} = \frac{1}{k_1 \cdot k_2}.$$

Данное звено, в силу своего дифференцирующего характера, активно работает только в начале переходного процесса, что и обеспечивает гибкость обратной связи.

Предлагаемое корректирующее устройство должно обеспечивать демпфирование колебаний с получением переходного процесса приемлемого качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Передаточная функция и динамические свойства замкнутого контура зависят от параметров объекта и корректирующего звена. Введение коррекции формирует эквивалентную передаточную функцию системы (рис. 1), имеющую следующий вид:

$$W(p) = \frac{1 + \frac{1}{k_1 k_2}}{\frac{T_1^2}{k_1 k_2} p^3 + (\frac{T_2}{k_1 k_2} + T_1^2) p^2 + (\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_1 k_2}) p + 1}. \quad (5)$$

Характеристическое уравнение колебательной системы третьего порядка в общем случае можно представить в следующем виде [12]:

$$(T'p + 1)(T^2 p^2 + 2\xi T p + 1) = 0, \quad (6)$$

где T – постоянная времени, определяющая колебательную составляющую переходного процесса; T' – постоянная времени, определяющая апериодическую составляющую переходного процесса; ξ – коэффициент затухания колебаний.

Характеристическое уравнение (6) имеет два комплексных сопряженных и один действительный корень.

Устойчивость рассматриваемого замкнутого контура (рис. 1) может быть повышена

с помощью правильного выбора параметров корректирующего устройства.

Задачей исследования является определение параметров k_1 и k_2 корректирующего устройства (рис. 2) в зависимости от параметров объекта управления. Объект управления имеет два параметра – постоянные времени T_1 и T_2 . Поэтому определение искоемых параметров осуществлено в форме двух типов численного эксперимента.

1 тип – для $T_2 = \text{const}$ определяются пары значений k_1 и T_1 , при которых качество переходного процесса системы является оптимальным (табл.1). Поскольку объект управления представляет собой колебательное звено с коэффициентом затухания $0 < \xi < 1$, для $T_2 = 0,5$ и $k_2 = 1$, диапазон изменения T_1 принят от 0,251 до 1. Коэффициенты k_1 подбирались методом ступенчатого спуска таким образом, чтобы перерегулирование не превышало 5 %, а время переходного процесса было наименьшим при сохранении темпа разгона. Полученная в результате дискретная зависимость $k = f(T_1)$ показана на рис. 3.

При увеличении T_1 коэффициент k_1 уменьшается. Это связано с тем, что коэффициент затухания растет, следовательно, и амплитуда колебаний растет, и чтобы ограничить её пятипроцентным коридором, необходимо уменьшить k_1 . Зависимость k_1 от T_1 – гиперболическая. Математически её можно представить как:

$$k_1 = \frac{k}{a + T_1} + b. \quad (7)$$

Аппроксимация по виду функции позволила получить коэффициенты: $a = -0,0859$; $b = 0,1868$; $k = 0,9947$. Расчет коэффициентов производился в среде MatLab. Функциональная зависимость имеет вид:

$$k_1 = \frac{0,9947}{T_1 - 0,0859} + 0,1868. \quad (8)$$

Аппроксимированный график представлен на рис. 3. Фрагмент скрипта, позволяющий проверить качество аппроксимации, представлен на рис. 4.

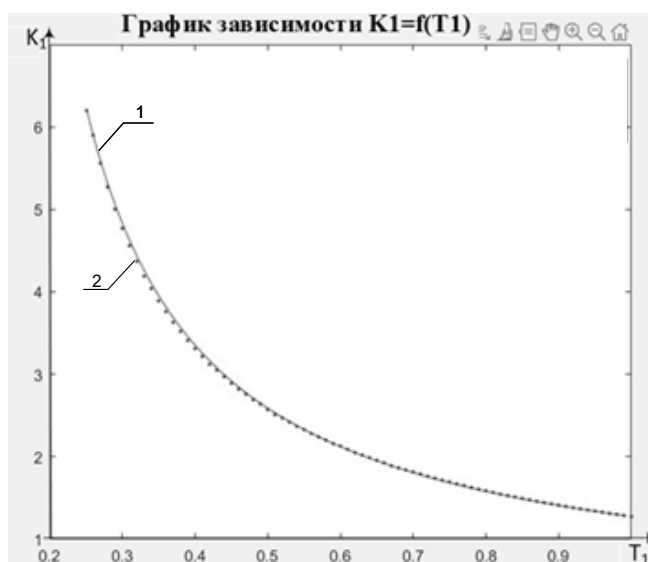
Таблица 1

Выборка результатов первого исследования

Table 1

Sampling of the results of the first study

T_1	k_1	T_1	k_1	T_1	k_1	T_1	k_1
0,251	6,2	0,44	2,97	0,63	2,02	0,82	1,547
0,26	5,9	0,45	2,89	0,64	1,989	0,83	1,529
0,27	5,56	0,46	2,82	0,65	1,956	0,84	1,512
0,28	5,27	0,47	2,76	0,66	1,925	0,85	1,494
0,29	5	0,48	2,69	0,67	1,89	0,86	1,477
0,3	4,77	0,49	2,64	0,68	1,865	0,87	1,46
0,31	4,56	0,5	2,57	0,69	1,84	0,88	1,444
0,32	4,37	0,51	2,51	0,7	1,816	0,89	1,428
0,33	4,19	0,52	2,47	0,71	1,79	0,9	1,413
0,34	4,04	0,53	2,42	0,72	1,763	0,91	1,397
0,35	3,89	0,54	2,37	0,73	1,74	0,92	1,382
0,36	3,76	0,55	2,33	0,74	1,715	0,93	1,368
0,37	3,63	0,56	2,28	0,75	1,695	0,94	1,354
0,38	3,52	0,57	2,24	0,76	1,67	0,95	1,34
0,39	3,41	0,58	2,2	0,77	1,65	0,96	1,326
0,4	3,31	0,59	2,16	0,78	1,627	0,97	1,312
0,41	3,216	0,6	2,13	0,79	1,606	0,98	1,3
0,42	3,12	0,61	2,09	0,8	1,587	0,99	1,287
0,43	3,05	0,62	2,05	0,81	1,567	1	1,274

Рис. 3. Зависимость k_1 от T_1 :

1 – Результат аппроксимации

2 – Дискретная зависимость

Fig. 3. Dependence of k_1 on T_1 :

1 – Approximation result

2 – Discrete dependence

```

A=solve (u);
k=double(A.z);
b=double(A.y);
a=double(A.x);
if KK==1
% проверка качества аппроксимации
figure (1)
for i=1:n
plot (t1(i),k1(i),'r')
hold on
end
t=min(t1):0.01:max(t1);
f=k./(t+a)+b;
plot(t,f)

```

Рис. 4. Фрагмент скрипта подпрограммы для аппроксимации в MatLab

Fig. 4. Fragment of the subprogram script for approximation in MatLab

На рис. 5 и 6 представлены функциональная схема и результаты численного эксперимента.

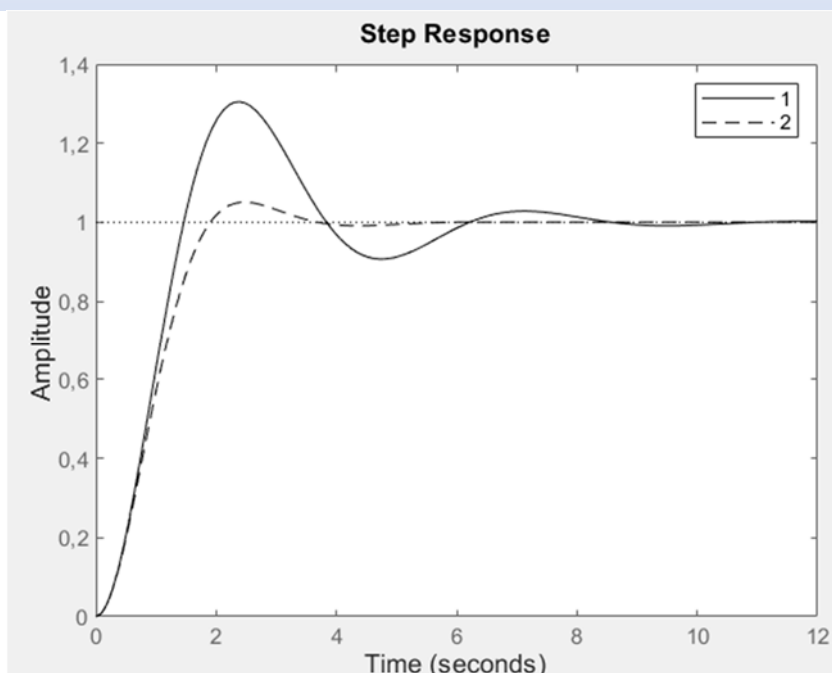


Рис. 5. Графики переходного процесса первого численного эксперимента:

1 – График переходных процессов без обратной связи;

2 – График переходных процессов с обратной связью

Fig. 5. Graphs of the transition process of the first numerical experiment:

1 – Graph of transients without feedback;

2 – Graph of transients with feedback

Таблица 2

Выборка результатов второго исследования

Table 2

Sampling of the results of the second study

T_2	k_1	T_2	k_1	T_2	k_1	T_2	k_1
0,01	1,199	0,21	1,476	0,41	1,94	0,61	2,91
0,02	1,21	0,22	1,49	0,42	1,97	0,62	2,99
0,03	1,22	0,23	1,513	0,43	2,01	0,63	3,07
0,04	1,23	0,24	1,529	0,44	2,05	0,64	3,15
0,05	1,24	0,25	1,55	0,45	2,08	0,65	3,245
0,06	1,25	0,26	1,57	0,46	2,12	0,66	3,338
0,07	1,265	0,27	1,59	0,47	2,16	0,67	3,458
0,08	1,275	0,28	1,61	0,48	2,19	0,68	3,57
0,09	1,289	0,29	1,63	0,49	2,23	0,69	3,68
0,1	1,31	0,3	1,65	0,5	2,273	0,7	3,8
0,11	1,32	0,31	1,67	0,51	2,32	0,71	3,93
0,12	1,33	0,32	1,696	0,52	2,37	0,72	4,1
0,13	1,345	0,33	1,72	0,53	2,42	0,73	4,26
0,14	1,36	0,34	1,748	0,54	2,47	0,74	4,4
0,15	1,375	0,35	1,77	0,55	2,52	0,75	4,6
0,16	1,39	0,36	1,8	0,56	2,58	0,76	4,81
0,17	1,41	0,37	1,828	0,57	2,64	0,77	5,05
0,18	1,425	0,38	1,85	0,58	2,7	0,78	5,31
0,19	1,437	0,39	1,88	0,59	2,77	0,79	5,56
0,2	1,46	0,4	1,91	0,6	2,84	0,8	5,8

При моделировании сигнал подавался одновременно на исходное колебательное звено и колебательное звено с корректирующим устройством. Результаты моделирования показывают, что использование корректирующего устройства позволяет демпфировать колебания в системе.

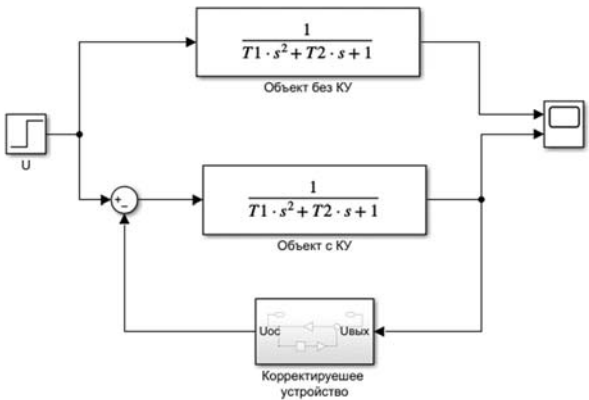


Рис. 6. Функциональная схема для эксперимента
Fig. 6. Functional scheme for the experiment

2-й тип экспериментальных исследований заключается в следующем: для выбранных значений $k_2 = \text{const}$ и $T_1 = \text{const}$ определяются пары значений k_1 и T_2 , при которых качество переходного процесса системы является оптимальным. Для проведения второй части исследования были приняты значения $k_2 = 5$, $T_1 = 0,5$. При этом T_2 изменялось так, чтобы звено второго порядка оставалось колебательным. В табл. 2 представлена выборка результатов исследования. Коэффициенты k_1 подбирались методом, аналогичным первому исследованию, требования к качеству переходного процесса не изменились. Результаты моделирования показывают, что при увеличении параметра T_2 происходит увеличение коэффициента k_1 . Дискретная зависимость k_1 от T_2 представлена на рис. 7.

Аппроксимация во втором исследовании проведена методом наименьших квадратов. Для получения качественной кривой создан многочлен пятого порядка. Выражение для расчета коэффициента k_1 , зависящего от T_2 , имеет вид:

$$k_1 = a_0 + a_1 \cdot T_2 + a_2 \cdot T_2^2 + a_3 \cdot T_2^3 + a_4 \cdot T_2^4 + a_5 \cdot T_2^5. \tag{9}$$

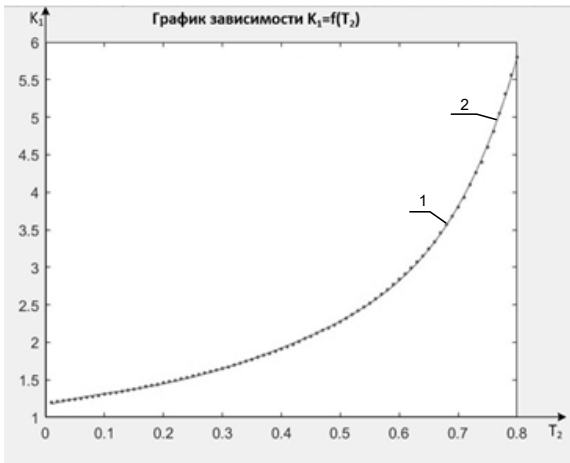


Рис. 7. Зависимость k_1 от T_2 :
1 – Дискретная зависимость
2 – Результат аппроксимации
Fig. 7. Dependence of k_1 on T_2 :
1 – specific dependence
2 – Result of approximation

```
a2=X(3);
a3=X(4);
a4=X(5);
a5=X(6);
if KK==1
% Проверка качества аппроксимации
h=(max(t1)-min(t1))/(n-1);
x=min(t1):h:max(t1);
P=a0+a1*x+a2*x.^2+a3*x.^3+a4*x.^4+a5*x.^5;
figure (1)
for i=1:n
plot (t1(i),k1(i),'.r')
hold on
end
plot(x,P)
hold off
end
```

Рис. 8. Фрагмент подпрограммы аппроксимации по методу наименьших квадратов
Fig. 8. Fragment of the least squares approximation routine

Таблица 3
Коэффициенты многочлена для аппроксимации
Table 3
Coefficients of the polynomial for approximation

a0	a1	a2	a3	a4	a5
1,15	2,46	-13,67	62,38	-107,7	72

Коэффициенты $a_0 \dots a_5$ получены в среде MatLab (рис. 7, табл. 3). Фрагмент кода подпрограммы аппроксимации представлен на рис. 8.

Схема моделирования представлена на рис. 5, а результат изображен на рис. 9.

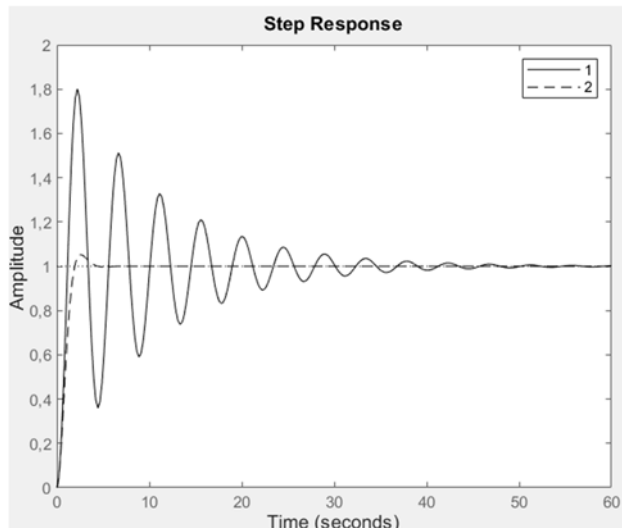


Рис. 9. Графики переходного процесса для второго численного эксперимента:

- 1 – График переходных процессов без обратной связи;
- 2 – График переходных процессов с обратной связью

Fig. 9. Graphs of the transition process for the second numerical experiment:

- 1 – Graph of transients without feedback
- 2 – Graph of transients with feedback

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы получены параметры гибкой обратной связи, обеспечивающей демпфирование колебаний переходных процессов звена второго порядка. Правильно подобранные коэффициенты дают возможность улучшить качество переходного процесса и добиться 5%-ного перерегулирования, а также уменьшить время переходных процессов до приемлемых для технологического процесса величин. Данный способ можно рассматривать как способ повышения энергоэффективности, например, электроприводных систем, так как позволяет уменьшить потери энергии, связанные с колебаниями переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ колебаний троса и способов их подавления для грузоподъемных механизмов / А.В. Марков, А.А. Подковырова, М.К. Хаджинов, О.А. Шведова // Доклады БГУИР. 2014. № 7 (85). С. 83-89.
2. Мещеряков В.Н., Ласточкин Д.В. Структурный анализ динамики электромеханических систем с упругими связями. Липецк, 2021. С. 47-49.
3. Семькина И.Ю., Завьялов В.М., Куприянов И.А. Повышение эффективности подавления упругих колебаний в элементах трансмиссии горных машин // Вестник КузГТУ. 2006. № 4.
4. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О.А. Шведова, А.С. Шмарловский, А.В. Марков, Т.В. Тарасевич // Доклады БГУИР. 2014. № 1 (79). С. 65-71.
5. Полянский В.А., Смирнова Н.А. Модальные алгоритмы подавления упругих вибраций: ограничения и перспективы // Noise Theory and Practice. 2023. № 2 (33). С. 52-63.
6. Shaping-алгоритмы подавления колебаний объектов управления / А.П. Кузнецов, А.В. Марков, А.С. Шмарловский, Т.В. Гаврилик // Доклады БГУИР. 2011. № 6 (60).
7. Коррекция колебаний в электромеханической системе асинхронного электродвигателя / Л.Н. Языкова, И.В. Музылева, В.Н. Мещеряков, Е.Г. Митин // Актуальные проблемы электроэнергетики : сборник научно-технических статей IX Всероссийской (XLII Региональной) научно-технической конференции. Нижний Новгород, 2023. С. 160-170.
8. Method for Improving Dynamic Characteristics of Electromechanical Transducer Based on Induction Motor / V. Meshcheryakov, L. Yazykova, I. Muzyleva [et al.]. DOI 10.1109/SUMMA60232.2023.10349540 // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). New Jersey, 2023.

9. Федорещенко Н.В. Гашение колебаний грузоподъемно-транспортных механизмов // Вестник ИрГТУ. 2023. Т. 27, № 1. С. 61-73.
10. Метод активного демпфирования напряжения с отрицательной обратной связью по току звена постоянного тока в электрических и гибридных электрических трансмиссиях / Е.О. Столяров, М.А. Гуляева, А.С. Анучин [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. № 2. С. 382-389.
11. Ключев В.И. Теория электропривода : учебник для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2001. 704 с. ISBN 5-283-00642-5.
12. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург : Профессия, 2004. 752 с.
13. Музылева И.В. Элементарная теория линейных систем в задачах и упражнениях. Санкт-Петербург : Лань, 2022. 428 с. ISBN 978-5-507-44723-7.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва : Наука. 1970. 720 с.
15. Расчет параметров корректирующего устройства для подавления колебаний звена 2 порядка / Л.Н. Языкова, Р.А. Сысоев, И.В. Музылева. [Б.м.] : [Б.и.], 2025. (Москва : Роспатент. 23.07.2025). № 2025669077. Текст: электронный.
4. Algorithms for suppressing vibration-sofloads of lifting and transport mechanisms using fuzzy logic of operation / O.A. Shvedova, A.S. Shmarlovsky, A.V. Markov, T.V. Tarasevich // Reports of the BSUIR. 2014. № 1 (79). P. 65-71.
5. Polyansky V.A., Smirnova N.A. Modal algorithms for suppressing elastic vibrations: limitations and prospects // Noise Theory and Practice. 2023. № 2 (33). P. 52-63.
6. Shaping-algorithms for suppressing fluctuations of control objects / A.P. Kuznetsov, A.V. Markov, A.S. Shmarlovsky T.V. Gavrilik // Reports of the BSUIR. 2011. № 6 (60).
7. Vibration correction in an electromechanical system of an asynchronous electric motor / L.N. Yazykova, I.V. Muzyleva, V.N. Meshcheryakov, E.G. Mitin // Actual problems of the electric power industry : Collection of scientific and technical articles of the IX All-Russian (XLII Regional) Scientific and Technical Conference. Nizhny Novgorod, 2023. P.160-170.
8. Method for Improving Dynamic Characteristics of Electromechanical Transducer Based on Induction Motor / V. Meshcheryakov, L. Yazykova, I. Muzyleva [et al.]. DOI 10.1109/SUMMA60232.2023.10349540 // 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). New Jersey, 2023.
9. Fedoreshchenko N.V. Damping of load fluctuations of lifting and transport mechanisms // Bulletin of IrSTU. 2023. № 1. P. 61-73.
10. Method of active voltage damping with negative feedback on the DC link current in electric and hybrid electric transmissions / E.O. Stolyarov, M.A. Gulyaeva, A.S. Anuchin [et al.] // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. № 2. P. 382-389.
11. Klyuchev V.I. Electric Drive Theory: textbook for universities / 2nd ed., revised and enlarged. Moscow : Energoatomizdat, 2001. 704 p. ISBN 5-283-00642-5.
12. Besekersky V.A., Popov E.P. Theory of automatic control systems. Saint Peters-

REFERENCES

1. Reports of the BSUIR. Analysis of cable vibration sand ways of the irsuppressi on for lifting mechanisms / A.V. Markov, A.A. Podkovyrova, M.K. Hadzhinov, O.A. Shvedova // Reports of the BSUIR. 2014. № 7 (85). P. 83-89.
2. Meshcheryakov V.N., Lastochkin D.V. Structural analysis of the dynamics of electromechanical systems with elastic bonds. Lipetsk, 2021. P. 47-49.
3. Semykina I.Y., Zavyalov V.M., Kupriyanov I.A. Improving the pressure efficiency of elastic vibrations in the transmission elements of mining machines // Bulletin of KuzSTU. 2006. № 4.

- burg : Profession, 2004. 752 p.
13. Muzyleva I.V. Elementary theory of linear systems in problems and exercises. Saint Petersburg : Lan, 2022. 428 p. ISBN 978-5-507-44723-7.
14. Korn G., Korn T. Handbook of Mathematics. Moscow : Nauka, 1970. 720 p.
15. Calculation of the parameters of the correction device for suppressing vibrations of the 2nd order link / L.N. Yazykova, R.A. Sysoev, I.V. Muzyleva. [B.M.] : [B.I.], 2025. (Moscow : Rospatent, 07.23.2025). № 2025669077. Text: Electronic.

УДК:621.592.3

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_24

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY AND WAYS TO REDUCE ELECTRICITY LOSSES IN THE ELECTRICAL INDUSTRY OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

©2025

Гаврина Оксана Александровна¹, кандидат технических наук, доцент
кафедры электроснабжения промышленных предприятий

Ключев Роман Владимирович², доктор технических наук, заведующий
кафедрой электроснабжения промышленных предприятий

Ярцев Денис Андреевич³, аспирант кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Гаврин Игорь Александрович⁴, студент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий

Gavrina Oksana Aleksandrovna¹, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises

Klyuev Roman Vladimirovich², Doctor of Technical Sciences, Head
of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises

Yartsev Denis Andreevich³, Postgraduate Student of the Department of Power
Supply of Industrial Enterprises

Gavrin Igor Aleksandrovich⁴, student of the Department of Power Supply of
Industrial Enterprises

*Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ (Россия)
North Caucasus Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz (Russia)*

E-mail: Gavrina_Oksana@yandex.ru

E-mail: kluev-roman@rambler.ru

E-mail: F.gus@bk.ru

E-mail: gavr2354@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9712-9075>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7288-1291>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4126-8385>

Аннотация: Статья посвящена комплексному анализу энергоэффективности электрохозяйства крупного металлургического предприятия – Никелевого завода. В работе систематизирована информация о структуре энергопотребления, составе основного электрооборудования, включая парк печных трансформаторов и силовых трансформаторов 6/0,4 кВ. Проведено детальное исследование динамики электропотребления за четырехлетний период, выявившее тенденцию к его снижению, преимущественно за счет технологических сегментов. Центральное место в исследовании занимает оценка уровня потерь мощности в низковольтной (0,4 кВ) и высоковольтной (6 кВ) приводных системах. Расчеты проведены для номинального и фактического режимов работы электродвигателей. Установлено, что средний уровень потерь в низковольтном приводе составляет 12,19 %, с максимальными значениями

в плавильном (14,18 %) и обжиговом (13,59 %) цехах. Для высоковольтного асинхронного привода средние потери достигают 9,88 %. Выявлены ключевые проблемы: массовая работа оборудования с низким коэффициентом загрузки, неоптимальный подбор мощности электродвигателей и наличие единиц оборудования с экстремально высокими удельными потерями. На основе проведенного анализа сформулирован комплекс практических рекомендаций по оптимизации энергопотребления, включая внедрение частотно-регулируемых приводов, модернизацию парка электродвигателей, внедрение систем мониторинга и компенсации реактивной мощности, что позволит существенно снизить эксплуатационные расходы и повысить энергоэффективность производства.

Ключевые слова: энергоаудит, энергоэффективность, потери электроэнергии, электропривод, трансформаторное оборудование, коэффициент загрузки, металлургическое предприятие.

Для цитирования: Анализ энергоэффективности и пути снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве металлургического предприятия / О.А. Гаврина, Р.В. Ключев, Д.А. Ярцев, И.А. Гаврин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 24–36. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_24.

Abstract: This article presents a comprehensive analysis of the energy efficiency of the electrical system at a large metallurgical enterprise, the Nickel Plant. The paper systematizes information on the energy consumption structure and the composition of the main electrical equipment, including the fleet of furnace transformers and 6/0.4 kV power transformers. A detailed study of electricity consumption dynamics over a four-year period revealed a downward trend, primarily due to technological segments. The study focuses on assessing the level of power losses in the low-voltage (0.4 kV) and high-voltage (6 kV) drive systems. Calculations were performed for the nominal and actual operating modes of the electric motors. It was found that the average loss level in the low-voltage drive is 12.19 %, with maximum values in the smelting (14.18 %) and roasting (13.59 %) shops. For the high-voltage asynchronous drive, average losses reach 9.88 %. Key issues were identified: widespread equipment operation with low load factors, suboptimal electric motor power selection, and the presence of equipment with extremely high specific losses. Based on the analysis, a set of practical recommendations for optimizing energy consumption was developed, including the implementation of variable frequency drives, modernization of electric motor fleets, and the implementation of reactive power monitoring and compensation systems. This will significantly reduce operating costs and improve production energy efficiency.

Keywords: energy audit, energy efficiency, energy losses, electric drive, transformer equipment, load factor, metallurgical enterprise.

For citation: Analysis of energy efficiency and ways to reduce electricity losses in the electrical industry of a metallurgical enterprise / O.A. Gavrina, R.V. Klyuev, D.A. Yartsev, I.A. Gavrinn // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 24–36. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_24.

ВВЕДЕНИЕ

Современная мировая металлургическая промышленность характеризуется высокой энергоемкостью производственных процессов. В условиях растущей стоимости энергоресурсов и ужесточения экологических требований задача повышения энергоэффективности становится не просто одним из факторов экономии, а ключевым элементом стратегии конкурентоспособности и устойчивого развития предприятий. Особенно это актуально для цветной металлургии, техно-

логические цепочки которой, такие как производство никеля и кобальта, связаны со значительными затратами электрической энергии на всех переделах — от подготовки сырья до получения готового продукта. Снижение удельных расходов электроэнергии напрямую влияет на себестоимость конечной продукции, что определяет актуальность глубоких и всесторонних исследований в данной области [1, 2].

Энергоэффективность металлургического комплекса зависит от множества факторов, среди которых можно выделить: техниче-

ское состояние и КПД основного и вспомогательного оборудования, оптимальность режимов его эксплуатации, уровень потерь в электрических сетях и системах электропривода, а также эффективность организации управления энергопотоками. Значительный резерв для экономии скрыт именно в системах электропривода, которые являются основными потребителями электроэнергии на любом промышленном предприятии [3, 4]. Неоптимальная загрузка электродвигателей, использование устаревших моделей с низким КПД, отсутствие систем регулирования скорости приводят к существенным непроизводительным потерям мощности, которые могут достигать 15–30 % от потребляемой энергии.

Объектом данного исследования выступает Никелевый завод — ключевое производственное предприятие в составе Заполярного филиала ПАО «ГМК «Норильский никель».

Завод обладает сложным, многоуровневым электрохозяйством, включающим мощные печные трансформаторы для плавильных и обжиговых печей, а также разветвленную сеть трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ и тысячи единиц низковольтного и высоковольтного приводного оборудования. Замкнутый технологический цикл предприятия, предполагающий комплексное использование сырья и побочных продуктов, предъявляет высокие требования к надежности и эффективности системы электроснабжения [5, 6].

Целью настоящей работы является комплексный анализ энергоэффективности электрохозяйства Никелевого завода, количественная оценка потерь электроэнергии в системах электропривода и разработка на этой основе практических рекомендаций по снижению энергопотребления и повышению эффективности использования электроэнергии.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования решались следующие задачи:

1. Провести обзор структуры предприятия и его электрохозяйства, проанализировать состав и характеристики основного электрооборудования, в частности, парка силовых и печных трансформаторов [7, 8].

2. Исследовать динамику и структуру общего электропотребления предприятия за многолетний период для выявления основных тенденций и потенциала экономии.

3. Выполнить расчет потерь электроэнергии в низковольтной (0,4 кВ) приводной системе по производственным цехам, идентифицировать оборудование с наибольшим уровнем потерь и проанализировать причины их возникновения.

4. Оценить уровень потерь в высоковольтном (6 кВ) приводе, раздельно проанализировав асинхронные и синхронные электродвигатели.

5. На основе проведенного анализа разработать комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на снижение потерь и оптимизацию энергопотребления [9, 10].

Методологической основой исследования послужили методы сравнительного анализа, статистической обработки данных электропотребления, а также расчетные методики определения потерь мощности в электродвигателях в номинальном и фактическом режимах работы с использованием данных инструментальных замеров.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты и сформулированные рекомендации могут быть использованы руководством и инженерно-техническими службами Никелевого завода для планирования и реализации программ энергосбережения, а также адаптированы для применения на других аналогичных предприятиях цветной металлургии [11, 12].

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ

Никелевый завод — одно из ключевых производственных предприятий в составе Заполярного филиала «Норильский никель». Он специализируется на выпуске никеля и кобальта, а также производит побочную продукцию: хлор и водород.

Основное сырьё, используемое в металлургическом процессе, включает:

- известняк, песчаник и уголь, поставляемые Управлением закладочных технологических и строительных материалов (УЗТСМ);

- никелевый шлак и серную кислоту, поступающие с Медного завода (МЗ);
- фاینштейн от Надеждинского металлургического завода (НМЗ);
- богатые руды с рудников «Комсомольский» и «Таймырский»;
- вкраплённые руды из рудника «Медвежий»;
- металлосодержащие оборотные материалы НМЗ и МЗ.

Производственная структура завода состоит из нескольких технологических цехов:

- агломерационная фабрика (АФ), функционирующая как автономный агломерационный цех (АЦ);
- плавильный цех (ПЦ);
- цех электролиза никеля (ЦЭН);
- хлорно-кобальтовый цех (ХКЦ);
- обжиговой цех (ОЦ).

Агломерационный цех специализируется на подготовке медно-никелевых концентратов к последующей плавке путём их агломерации. Параллельно здесь осуществляется утилизация бедных газов обжига с получением бисульфита натрия.

Плавильный цех выполняет переработку низкосортного сырья и промежуточных металлосодержащих продуктов в фاینштейн — промежуточный сплав, содержащий цветные металлы.

Обжиговой цех обеспечивает разделение фاینштейна на медный и никелевый концентраты, что позволяет выделить целевые металлы для дальнейшей переработки.

Хлорно-кобальтовый цех ориентирован на выпуск кобальтовой продукции, включая металлический кобальт огневого рафинирования и оксид кобальта.

Цех электролиза никеля является завершающим звеном технологической цепочки, где производится конечная продукция — чистый никель электролитный.

Технологическая цепочка предприятия представляет собой замкнутый цикл, где каждый передел выполняет строго определённую функцию. Особенностью производства является комплексное использование сырья — даже отходящие газы и промежуточные продукты находят практическое применение.

Например, бисульфит натрия, получаемый из отходящих газов агломерации, мо-

жет использоваться в химической промышленности или для очистки технологических выбросов [13, 14].

Современные тенденции развития металлургического производства требуют от предприятия постоянного совершенствования технологических процессов. Перспективными направлениями являются: внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами; оптимизация энергопотребления за счёт рекуперации тепла отходящих газов; разработка методов более глубокого извлечения ценных компонентов из сырья; снижение экологической нагрузки через совершенствование газоочистного оборудования.

Эффективность работы всего предприятия в значительной степени зависит от слаженного функционирования всех технологических переделов и оптимальной организации материальных потоков между цехами.

ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТП

В рамках проведения энергоаудита Никелевого завода была собрана и систематизирована информация о структуре электрохозяйства предприятия, включая состав основного электрооборудования и распределительных сетей, а также проанализированы данные об электропотреблении за несколько лет.

Энергоснабжение плавильных печей завода обеспечивается парком из 18 специальных печных трансформаторов, основные технические характеристики и места установки которых приведены в табл. 1.

Электроснабжение технологического и вспомогательного оборудования низковольтного напряжения (0,4 кВ) организовано через 64 трансформаторные подстанции, на которых суммарно установлено 127 силовых трансформаторов с номинальным напряжением 6/0,4 кВ.

Анализ структуры электрохозяйства показывает, что предприятие обладает разветвленной и многоуровневой системой электроснабжения. Наличие трансформаторов различной мощности и классов напряжения свидетельствует о сложном технологическом процессе, требующем разных уровней энергоснабжения [15, 16].

Характеристики печных трансформаторов

Table 1

Characteristics of furnace transformers

№ п/п	Тип трансформатора	Мощность, МВА	Напряжение, кВ	Место установки	
				№ КПП	№ печи
Плавильный цех (ПЦ)					
1-9	TTVU-640-0	25	35/0,2-0,8	№1-№3	РТП-3, РТП-4, РТП-5
Обжиговый цех (ОЦ)					
1-5	ЭТЦПК-12500/10	12,5	6/0,2-0,5	№1-№4, КПП РНБ-5	РНБ-1 - РНБ-5
6	ЭТЦНК-20000/35	20	35/0,2-0,5	КПП ОКБ-892	ОКБ-892
Хлорно-кобальтовый цех (ХКЦ)					
1-3	ЭПТМ-1000	1,0	0,38/0,036	№1-№3	Грамолина-1 - Грамолина-3

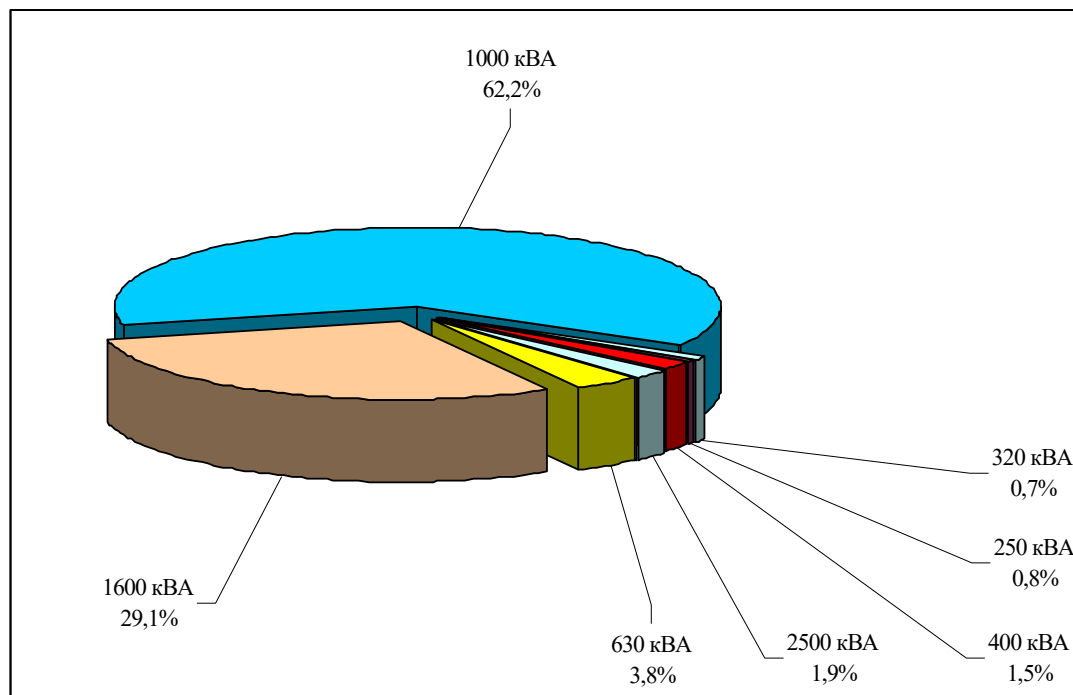


Рис. 1. Анализ распределения трансформаторов 10(6) кВ по диапазонам их номинальной мощности

Fig. 1. Analysis of the distribution of 10(6) kV transformers by their rated power ranges

Для повышения энергоэффективности системы электроснабжения рекомендуется:

- провести детальный анализ нагрузочных характеристик трансформаторов для выявления возможностей оптимизации их работы;
- рассмотреть вопрос внедрения системы компенсации реактивной мощности;

– разработать программу поэтапной замены устаревшего трансформаторного оборудования на более энергоэффективные модели;

– внедрить систему мониторинга и управления нагрузками для выравнивания суточного графика электропотребления.

Особое внимание следует уделить транс-

форматорам плавильного цеха как наибольшим потребителям электроэнергии, где даже незначительное повышение КПД может дать существенный экономический эффект.

На рис. 1 представлен анализ распределения трансформаторов 10(6) кВ по диапазонам их номинальной мощности.

Анализ данных (рис. 1) показывает, что трансформаторы мощностью 1000 кВА составляют основу электрохозяйства предприятия – их совокупная доля в общем парке оборудования превышает 62 %.

Такая концентрация оборудования одного типа имеет как преимущества, так и риски. К преимуществам можно отнести: унификацию запасных частей и технического обслуживания; снижение затрат на обучение персонала; упрощение системы мониторинга и диагностики.

Однако существует и значительный риск – высокая зависимость от одного типа оборудования может привести к системным

проблемам при выявлении конструктивных недостатков или дефиците запчастей.

Для оптимизации структуры трансформаторного парка рекомендуется: провести анализ нагрузки трансформаторов 1000 кВА для выявления возможностей замены части из них на менее мощные модели в слабонагруженных узлах; разработать программу постепенной диверсификации парка с внедрением трансформаторов мощностью 630 кВА и 1600 кВА в соответствующих точках сети; внедрить систему мониторинга технического состояния доминирующей группы трансформаторов для прогнозирования их остаточного ресурса.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

На рис. 2 представлен анализ изменения объемов электропотребления предприятием на протяжении четырехлетнего периода.

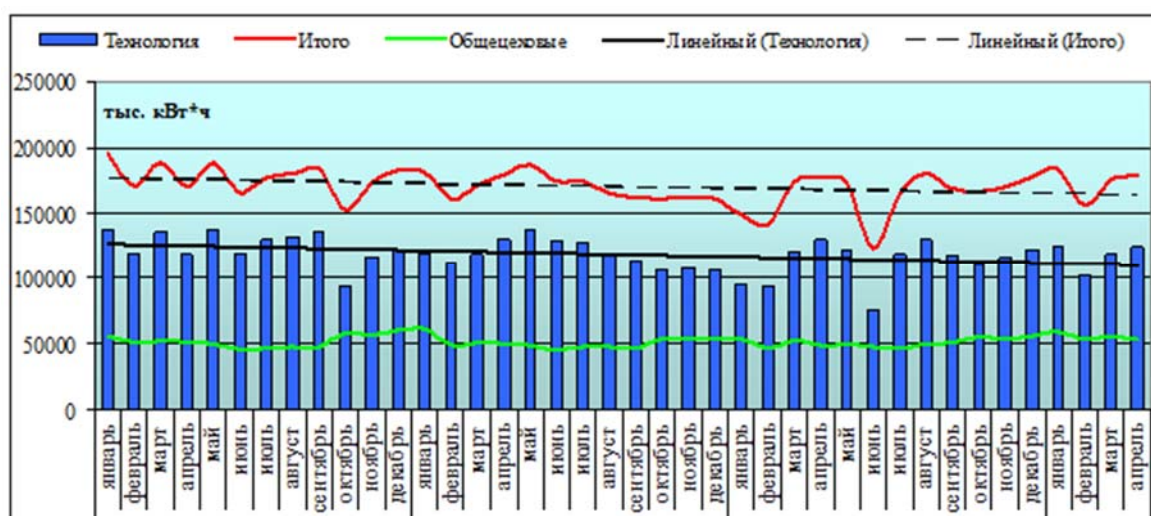


Рис. 2. Анализ изменения объемов электропотребления предприятием на протяжении четырехлетнего периода

Fig. 2. Analysis of changes in the volume of electricity consumption by an enterprise over a four-year period

Анализ графиков электропотребления (рис. 2) демонстрирует относительно стабильный характер нагрузки предприятия с небольшой тенденцией к снижению. Основной вклад в общее уменьшение потребления электроэнергии вносит сокращение технологических расходов. Расчет среднемесяч-

ных показателей за четырёхлетний период выявил следующую структуру затрат:

- на технологические нужды – 119,1 млн кВт·ч;
- на общепроизводственные и общезаводские нужды – 51,4 млн кВт·ч;

- общее потребление по предприятию – 170,5 млн кВт·ч.

Наблюдаемое снижение технологического энергопотребления, вероятно, связано с поэтапным внедрением энергосберегающих мероприятий и оптимизацией производственных процессов. Однако для более точного выявления причин данной динамики необходим детальный поцеховой анализ.

Для дальнейшего повышения энергоэффективности рекомендуется: внедрение системы детального мониторинга энергопотребления по основным переделам производства; разработка и реализация целевой программы по снижению общезаводских расходов, которые составляют значительную долю (около 30 %) в общем балансе; проведение технического аудита крупных энергопотребляющих установок для выявления резервов экономии; изучение возможности рекуперации вторичных энергетических ресурсов технологических процессов [17, 18].

Стабильность общего графика нагрузки является положительным фактором для энергосистемы, но требует оптимизации внутривидового распределения для снижения себестоимости продукции.

УРОВЕНЬ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРИВОДНОЙ СИСТЕМЕ 0,4 КВ

Для определения объемов непроизводительных затрат электроэнергии в системе электропривода предприятия был выполнен расчёт потерь для электродвигателей в двух режимах: номинальном и фактическом (текущем). Поскольку данные о реальном коэффициенте полезного действия (КПД) приводов отсутствовали, в основу расчётов были положены следующие допущения:

1. Режим эксплуатации электроприводов в момент проведения замеров принимается за типовой (нормальный) режим работы, который сохраняется неизменным на протяжении всего года.

2. Значение КПД для всех анализируемых приводов принято постоянным и составляющим 90 %.

Полученные результаты позволяют оце-

нить потенциал энергосбережения за счёт оптимизации работы электропривода. Снижение потерь может быть достигнуто за счёт:

- внедрения частотно-регулируемых приводов для работы оборудования в оптимальных режимах;
- замены устаревших электродвигателей на современные энергоэффективные модели;
- регулярного проведения технического обслуживания и контроля качества электроэнергии.

Для более точной оценки необходимо в дальнейшем уточнить реальные значения КПД приводов при различных нагрузках, а также провести детальный анализ графиков работы оборудования в течение года.

В качестве примера рассчитаем потери электроэнергии для двигателя транспортера 21 СТ ($P_n = 200$ кВт) в плавильном цехе для номинального и фактического режимов работы.

Расчет номинальных потерь:

$$\Delta P_n = \frac{(1-\eta)}{\eta} \cdot P_n, \quad (1)$$

$$\Delta P_n = \frac{(1-0,92)}{0,92} \cdot 200 = 17,39 \text{ кВт},$$

где $\eta = 0,92$ – коэффициент полезного действия двигателя.

Расчет текущих потерь:

$$\Delta P_{\text{тек}} = 0,35 \cdot \Delta P_n + k_z \cdot 0,65 \cdot \Delta P_n, \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{тек}} = 7,51 \text{ кВт},$$

где $k_z = 0,21$ – коэффициент загрузки двигателя.

Проведенный расчет наглядно демонстрирует значительную разницу между номинальными и фактическими потерями электроэнергии. Текущие потери составляют всего 43 % от номинальных, что напрямую связано с низким коэффициентом загрузки двигателя (21 %). Данная ситуация свидетельствует о неоптимальном выборе мощности электродвигателя для конкретно-

го технологического процесса.

Анализ расчетных данных по потерям электроэнергии в низковольтном приводе 0,4 кВ выявил следующую картину по производственным цехам.

Средний уровень потерь по предприятию составил 12,19 %. Наибольшие потери наблюдаются в плавильном цехе (14,18 %) и обжиговом цехе (13,59 %), что объясняется высокой концентрацией транспортерного и насосного оборудования с низкими коэффициентами загрузки. В хлорно-кобальтовом цехе потери составляют 13,86 %, при этом выявлены отдельные единицы оборудования с экстремально высокими удельными потерями, такие как вентилятор АР-3 (73,43 %) и насос Н-7-1 (133,94 %), работающие в режиме значительной недогрузки.

Наименьшие потери зафиксированы в цехе электролиза никеля (10,43 %) и агломерационном цехе (12,74 %), что свидетельствует о более оптимальном подборе и использовании электродвигателей.

Критические проблемы, выявленные в ходе анализа:

1. Многочисленные случаи работы оборудования с низким коэффициентом загрузки, приводящие к повышенным относительным потерям (например, дробилки № 6 и № 7 в агломерационном цехе с потерями 65–74 %).

2. Значительная доля потерь в транспортерном оборудовании, особенно в плавильном и обжиговом цехах, где отдельные транспортеры демонстрируют уровень потерь 25–60 %.

3. Наличие оборудования с экстремально высокими удельными потерями, требующего немедленного вмешательства.

Для повышения энергоэффективности рекомендуется:

- провести детальный анализ рабочего цикла транспортера для обоснования возможности установки двигателя меньшей мощности;

- рассмотреть вопрос внедрения частотно-регулируемого привода, который позволит точно согласовать скорость движения транспортера с технологической необходимостью и дополнительно снизить потери;

- организовать регулярный мониторинг коэффициента загрузки для всего насосного

и вентиляторного оборудования предприятия;

- разработать методику оптимального подбора электродвигателей с учетом реальных, а не паспортных нагрузок.

Эти мероприятия позволят не только снизить эксплуатационные расходы, но и продлить срок службы электрооборудования за счет работы в оптимальном режиме [19, 20].

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРИВОДЕ НА НАПРЯЖЕНИИ 6 КВ

На предприятии эксплуатируются электродвигатели двух основных типов: асинхронные и синхронные. Расчет потерь электроэнергии для асинхронных двигателей напряжением 6 кВ выполнен по методике, аналогичной используемой для низковольтных двигателей 0,4 кВ.

Анализ расчетных данных показывает следующее распределение потерь:

- средний уровень потерь в высоковольтном асинхронном приводе по предприятию составляет 9,88 %. Наибольшие потери наблюдаются в обжиговом цехе (12,60 %), где отдельные дымососы демонстрируют исключительно высокие показатели – до 30,17 %, что свидетельствует о недогрузке оборудования;

- в агломерационном цехе зафиксирован средний уровень потерь 9,88 %, однако здесь выявлены проблемные единицы оборудования, такие как транспортер А-14 с потерями 30,97 % и конвейер СВ-7 с показателем 20,12 %. При этом мощное насосное и вентиляторное оборудование показывает относительно хорошие результаты (8,14–8,96 %);

- плавильный цех демонстрирует один из лучших показателей – 9,61 %, за исключением вентилятора № 8В с потерями 16,86 %. Цех электролиза никеля имеет наименьший уровень потерь среди всех подразделений – 8,66 %.

Ключевые проблемы:

- критическая недогрузка дымососов в обжиговом цехе;

- неоптимальная работа отдельных транспортеров в агломерационном цехе;

• значительный разброс показателей внутри цехов.

Общий резерв снижения потерь оценивается в 1,5–2 процентных пункта, что может обеспечить существенную экономию электроэнергии.

Потери мощности в электродвигателе при установившейся работе определяются как сумма двух составляющих:

$$\Delta P = K + V(\Delta P_1), \quad (3)$$

где K – это постоянные потери, величина которых не зависит от нагрузки двигателя;

$V(\Delta P_1)$ – переменные потери, возникающие в обмотках.

Расчёт номинальных потерь выполняется по формуле (1).

Переменные потери при номинальной нагрузке определяются по выражению:

$$V_{\text{ном}} \left(\Delta P_{\text{I ном}} \right) = 3 \cdot I_{\text{ном}}^2 \cdot R^2, \quad (4)$$

где $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток статора;

R – активное сопротивление обмотки статора.

Постоянные потери могут быть найдены из выражения:

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}}. \quad (5)$$

Текущие переменные потери, определяемые на основе инструментальных измерений тока статора (I_T), рассчитываются по формуле:

$$V_T = \Delta P_{\text{I ном}} \cdot \left(\frac{I_T}{I_{\text{ном}}} \right)^2. \quad (6)$$

Суммарные текущие потери в двигателе определяются как:

$$\Delta P_T = K + V_T. \quad (7)$$

Согласно данным расчетов, средняя величина потерь электроэнергии в синхронных электродвигателях 6 кВ достигает

5,44 % от общего объема потребления. При годовом электропотреблении асинхронного привода 6 кВ в 2007 году в размере 247061,2 тыс. кВт·ч абсолютные потери за год составили 13440 тыс. кВт·ч.

Анализ структуры потерь по производственным цехам.

Наибольшие потери наблюдаются в агломерационном цехе – 6,59 %, где особенно выделяются вентиляторы СДВ-16-51-12 с потерями 10,25–11,34 %, что свидетельствует о работе в режиме значительной недогрузки. Обжиговой цех демонстрирует схожий показатель – 6,10 %, при этом все вентиляторные установки имеют потери в диапазоне 5,65–6,93 %. Плавильный цех характеризуется наиболее эффективной работой синхронного привода с минимальными потерями – 3,49 %, где нагнетатели СТД показывают относительно низкие значения потерь (2,48–4,22 %).

Ключевые проблемы: критическая недогрузка вентиляторов СДВ-16-51-12 в агломерационном цехе; стабильно высокий уровень потерь в вентиляторном оборудовании обжигового цеха; значительный разброс показателей эффективности внутри цехов.

Рекомендации:

1. Приоритетная оптимизация работы вентиляторного оборудования в агломерационном и обжиговом цехах.

2. Внедрение системы адаптивного управления производительностью вентиляторов.

3. Разработка программы модернизации наименее эффективных двигателей.

4. Внедрение системы постоянного мониторинга коэффициента загрузки.

Снижение потерь в синхронном приводе до 4,5 % позволит сэкономить около 2 500 тыс. кВт·ч электроэнергии ежегодно.

ВЫВОДЫ

Проведенное комплексное исследование энергоэффективности электрохозяйства Никелевого завода позволило сформулировать следующие выводы:

1. Предприятие обладает сложным, разветвленным и многоуровневым электрохозяйством, характеризующимся высокой концентрацией трансформаторов одного типа (1000 кВА), что создает риски системных сбоев, но также открывает возможности для унификации обслуживания.

2. Анализ электропотребления за четырехлетний период демонстрирует положительную тенденцию к его снижению при сохранении стабильного графика нагрузки. Однако значительная доля общезаводских расходов (около 30 %) указывает на наличие резервов для дальнейшей оптимизации.

3. Ключевой проблемой энергоэффективности являются значительные потери в системах электропривода. Установлено, что средний уровень потерь в низковольтном приводе (0,4 кВ) составляет 12,19 %, при этом в отдельных цехах (плавильный, обжиговой, хлорно-кобальтовый) этот показатель превышает 13,5 %. Наибольший вклад вносят транспортное, насосное и вентиляционное оборудование, работающее с низким коэффициентом загрузки (часто ниже 30 %).

4. В высоковольтном асинхронном приводе (6 кВ) средние потери достигают 9,88 %, с максимальными значениями в обжиговом цехе (12,60 %). Синхронный привод демонстрирует лучшую эффективность (средние потери 5,44 %), однако и здесь выявлены проблемные зоны, такие как вентиляторы в агломерационном цехе с потерями более 10 %.

5. Основными причинами высоких потерь являются неоптимальный подбор мощности электродвигателей под реальную технологическую нагрузку, отсутствие систем регулирования скорости (частотно-регулируемых приводов) и работа значительной части оборудования в режиме хронической недогрузки.

На основе выявленных проблем разработан комплекс рекомендаций, реализация которых позволит существенно повысить энергоэффективность предприятия. К ним относятся: внедрение частотно-регулируемых приводов для насосов, вентиляторов и транспортеров; оптимизация

структуры трансформаторного парка и внедрение компенсации реактивной мощности; разработка программы поэтапной замены устаревших электродвигателей на энергоэффективные модели; создание системы детального мониторинга энергопотребления и коэффициента загрузки ключевого оборудования. Реализация предложенных мер позволит не только снизить эксплуатационные расходы на электроэнергию на сотни тысяч киловатт-часов ежегодно, но и повысить надежность работы электрооборудования и снизить экологическую нагрузку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Горный журнал. 2022. № 2. С. 72-76.
2. Моргоева А.Д., Ключев Р.В., Ляшенко В.И. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 39-51.
3. Разработка метода решения задач системного анализа в природно-промышленной системе / А.А. Соколов, А.Ю. Аликов, И.И. Босиков, Ю.С. Петров // Перспективы науки. 2010. № 4 (6). С. 83-85.
4. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 3. С. 895-908.
5. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 103-115.

6. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. DOI 10.3390/en14102737 // Energies. 2021. Vol. 14. article 2737.
7. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov. DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062033 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333 (6).
8. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
9. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment / P.V. Shishkin, B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev [et al.]. DOI 10.3390/math12111660 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 11. P. 1660.
10. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
11. Oprea S.V. Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
12. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels / P.D. Patil, R. Patil, P. Ahire [et al.]. DOI 10.1016/j.prime.2024.100628 // e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2024. Vol. 8. P. 100628.
13. Albuquerque P.C., Cajueiro D.O., Rossi M.D.C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. DOI 10.1016/J.ESWA.2021.115917 // Expert Syst Appl. 2022. Vol. 187. article 115917.
14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2024. № 3. P. 170-181.
15. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.
16. Zhou C., Chen X. China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. DOI 10.1016/j.egy.2021.08.103 // Predicting Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 5086-5099.
17. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression.. DOI 10.1016/j.spl.2022.109693 // Statistics & Probability Letters. 2022. Vol. 193. article 109693.
18. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy / A. Yousaf, R.M. Asif, M. Shakir [et al.]. DOI 10.3390/su13116199 // Sustainability. 2021. Vol. 13. article 6199.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Kante M., Li Y., Deng S. Scenarios Analysis on Electric Power Planning Based on Multi-Scale Forecast: A Case Study of Taoussa. DOI 10.3390/en14248515 // Mali

from 2020 to 2035. *Energies*. 2021. Vol. 14. article 8515.

REFERENCES

1. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Modeling power use at processing plant. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // *Gornyi Zhurnal*. 2022. № 2. P. 72-76.
2. Forecasting the load on the power grid as a way to effectively manage the consumption of electrical energy / A.D. Morgoeva, I.D. Morgoev, R.V. Klyuev, V.I. Lyashenko. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // *News of Higher Educational Institutions of the Chernozyem Region*. 2021. № 4 (66). P. 39-51.
3. Development of the technique for system analysis problem-solving in physical industrial system / A.A. Sokolov, A.Yu. Alikov, I.I. Bosikov, Yu.S. Petrov // *Science prospects*. 2010. № 4 (6). P. 83-85.
4. Zhukovskiy Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024. Vol. 16, № 3. P. 895-908.
5. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency // *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019. Vol. 11, № 2 (42). P. 103-115.
6. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. DOI 10.3390/en14102737 // *Energies*. 2021. Vol. 14. article 2737.
7. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform / Y. Zhukovskiy, D. Batueva, A. Buldysko, M. Shabalov. DOI 10.1088/1742-6596/1333/6/062033 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1333 (6).
8. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
9. Mathematical logic model for analysing the controllability of mining equipment / P.V. Shishkin, B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev [et al.]. DOI 10.3390/math12111660 // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, № 11. P. 1660.
10. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // *Mathematics*. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
11. Oprea S.V. Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
12. An adaptive methodology based on predictive deep learning and context aware clustering for electricity power usage mining and optimization at different granularity levels / P.D. Patil, R. Patil, P. Ahire [et al.]. DOI 10.1016/j.prime.2024.100628 // *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 2024. Vol. 8. P. 100628.
13. Albuquerque P.C., Cajueiro D.O., Rossi M.D.C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. DOI 10.1016/J.ESWA.2021.115917 // *Expert Syst Appl*. 2022. Vol. 187. article 115917.
14. Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_170 // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2024. № 3. P. 170-181.
15. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148

- // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.
16. Zhou C., Chen X. China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. DOI 10.1016/j.egy.2021.08.103 // Predicting Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 5086-5099.
17. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression.. DOI 10.1016/j.spl.2022.109693 // Statistics & Probability Letters. 2022. Vol. 193. article 109693.
18. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy / A. Yousaf, R.M. Asif, M. Shakir [et al.]. DOI 10.3390/su13116199 // Sustainability. 2021. Vol. 13. article 6199.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Kante M., Li Y., Deng S. Scenarios Analysis on Electric Power Planning Based on Multi-Scale Forecast: A Case Study of Taoussa. DOI 10.3390/en14248515 // Energies. 2021. Vol. 14. article 8515.

УДК 621.311

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_37

КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ КАК ФАКТОРЫ УГРОЗЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИИ

CONDUCTED LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AS A THREAT TO ENERGY SECURITY IN RUSSIA

©2025

Мочалин Константин Сергеевич¹, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Денчик Юлия Михайловна¹, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Сальников Василий Герасимович¹, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем и электротехники

Антонов Александр Игоревич², кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования,

Руди Дмитрий Юрьевич², старший преподаватель кафедры электротехники и электрооборудования

Руппель Александр Александрович², кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования

Mochalin Konstantin Sergeevich¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Denchik Yulia Mikhailovna¹, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Salnikov Vasily Gerasimovich¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor, Department of Electric Power Systems and Electrical Engineering

Antonov Alexander Igorevich², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment, Associate Professor of the Department of Humanities, Natural Sciences and Technical Disciplines

Rudi Dmitry Yurievich², Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment

Ruppel Alexander Alexandrovich², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment

¹Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск (Россия)

²Омский институт водного транспорта, Омск (Россия)

¹Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk (Russia)

²Omsk Institute of Water Transport, Omsk (Russia)

E-mail: mochalin@nsawt.ru

E-mail: elektrotex@mail.ru

E-mail: kees@nsawt.ru

E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru

E-mail: dima_rudi@mail.ru

E-mail: ruppelsan@mail.ru

Аннотация: Обеспечение качества электроэнергии и электромагнитной совместимости на сегодняшний день является первоочередной задачей энергетической безопасности. Энергетическая инфраструктура рассматривается как одна из критически важных инфраструктур Российской Федерации (РФ). Развитие промышленности в РФ и непрерывный рост мощностей электропотребителей привело к тому, что качество электроэнергии не соответствует нормативно-технической документации, что, в свою очередь, приводит к появлению кондуктивных низкочастотных электромагнитных помех.

Ключевые слова: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, энергетическая безопасность, кондуктивная помеха.

Для цитирования: Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи как факторы угрозы энергетической безопасности России / К.С. Мочалин, Ю.М. Денчик, В.Г. Сальников, А.И. Антонов, Д.Ю. Руди, А.А. Руппель // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 37–44. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_37.

Abstract: Ensuring power quality and electromagnetic compatibility is currently a top priority for energy security. Energy infrastructure is considered critically important in the Russian Federation. Industrial development in the Russian Federation and the continuous growth of electricity consumers have led to power quality not meeting regulatory and technical requirements. This, in turn, leads to the emergence of low-frequency conducted electromagnetic interference.

Keywords: power quality, electromagnetic compatibility, noise immunity, energy security, conducted interference.

For citation: Conductive low-frequency electromagnetic interference as factors threatening Russia's energy security / K.S. Mochalin, Y.M. Denchik, V.G. Salnikov, A.I. Antonov, D.Yu. Rudi, A.A. Ruppel // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 37–44. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_37.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасная и экономическая эффективная деятельность промышленных предприятий различной деятельности обусловлена качественной электрической энергией (ЭЭ). Основную роль в определении требований к ЭЭ, доставляемой генерирующими компаниями, выполняют стандарты электромагнитной совместимости (ЭМС) и качества электрической энергии (КЭ). ГОСТ 32144–2013 выполняет роль основополагающего нормативно-технического и методического документа, в котором установлены нормы КЭ в электрических сетях систем электрооборудования общего назначения [1].

Показатели КЭ как параметры режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) во многом воздействуют на ЭМС технических средств (ТС). Чтобы соответствовать уровням ЭМС, нормы и требования которых приведены в стандарте [1], необходимо

обеспечить технико-экономические показатели производства и качества выпускаемой продукции, защиту жизни и здоровья обслуживающего персонала и граждан в целом, а также защиту электрооборудования [2, 3].

Усугубление ЭМО в электрических сетях общего назначения происходит из-за превышения значений показателей КЭ, которые вышли за нормативно-допустимые пределы стандарта [1]. Из-за текущей проблемы уровни ЭМС технических средств ухудшаются, что в свою очередь обуславливает понижение качества функционирования электрических сетей [2]. В дальнейшем в тексте работы вводится понятия «нестандартные показатели КЭ».

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

Электроэнергия, если рассматривать её как товар для различных рынков, характери-

зуется множественными отличительными признаками. основополагающими характеристиками являются: прямое воздействие на разработку изделий различных направлений, а также финансовый критерий производства высококачественного продукта. Все эти признаки напрямую влияют на качество функционирования электрического оборудования [4].

Затруднительность в обеспечении ЭМС технических средств в первую очередь выражается в неустойчивости электрических режимов в ЭЭС, а также низкокачественной ЭЭ.

На практике в электроснабжении на разных уровнях напряжения происходит большое количество коммутационных переключений электропотребителей (технологических, аварийных), варьируется их режим работы, работает автоматика управления режимами электроэнергетических систем и т. д. Более того, регулярно возникают аварийные ситуации (короткие замыкания, обрыв кабельной линии, перенапряжения из-за грозных явлений). Собственно говоря, установившегося режима ЭЭС не существует, а происходит непрерывное изменение режимов — не прекращающийся переходный процесс, протекающий во времени [5].

Показатели КЭ представляют собой основополагающие параметры рассматриваемых режимов ЭЭС. В связи с этим, в ЭЭС регионов и городов полагается внедрение системы непрерывного мониторинга за КЭ. Одновременно с этим ключевые обязанности измерений представляют собой:

- контроль показателей КЭ в соответствии с требованиями госстандарта [2];
- определение факторов расхождений показателей КЭ в соответствии с требованиями нормативно-технической документации [1, 5].

При всех видах испытаний, контроля и измерений показателей КЭ, кроме технологического контроля, надлежит задействовать различные инструменты измерений, воплощающие последовательность действий по обработке результатов измерений согласно условиям ГОСТ 32144–2013 [1, 5].

Впрочем, при существенных несоответствиях показателей КЭ, специальные изме-

рительные устройства (амперметры, вольтметры, счетчики) подлинно не демонстрируют ЭМО из-за расхождения интервалов усреднения скоростей электромагнитных переходных процессов. Данные показатели КЭ дают возможность определить нарушения уровней ЭМС технических средств и опосредованно оценивать действующие в ЭЭС случайные процессы. Помимо этого, современные приборы-анализаторы КЭ (например, «Ресурс-ПКЭ-1.7») представляют показатели КЭ как непрерывно распределенные случайные величины в виде таблиц. Исходя из этого, случайному процессу свойственна неконкретность, поскольку описание ЭМО табличным способом подразумевает вариант определённой системы интервалов, который обуславливается несколькими факторами: опыт исследователя и точность измерений [2, 3, 6].

Первостепенной задачей представления возникновения и влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на режим работы электрической сети с позиции ЭМС является физическое (графическое) представление поля событий в трёхфазных электрических сетях при нестандартных показателях качества электроэнергии [7]. Согласно нормативно-техническому документу ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000–2–5–95) [8], кондуктивные низкочастотные ЭМП представляют собой непредотвратимую угрозу нарушению нормальной работы ЭЭС.

Ключевым обстоятельством восприимчивости электрических сетей разного электрического напряжения в электросетях (низкое, среднее, высокое) промышленных предприятий служат незначительные показатели полной мощности трёхфазных КЗ. В указанных электрических сетях наилучшим образом приводится степень соответствия характеристик энергии в данной точке сети совокупности нормируемых ГОСТ 32144–2013 значений.

Выполнение установленного задания реализуется методом аналогии, в котором подразумевается применение разных видов аналогии (физической и математической) между ЭМО в электрических сетях при нарушениях показателей КЭ и понятием «испытание» в теории вероятностей и мате-

матической статистики. Критерии данной аналогии [9], позволяющей описать пользования операций над событиями при анализе ЭМО в электрических сетях, приведены в научном источнике [10].

ЭМО на подстанциях и в электрических сетях обладает в большей степени возможными электромагнитными воздействиями. По условиям, представленным в [8] ЭМО систематизируется по 4 классам: от лёгкой (класс 1-й) и средней жёсткости (класс 2-й) до жёсткой (класс 3-й) и крайне жёсткой (класс 4-й). Согласно МЭК 61000-2-5-2002 ко всем классам формируются планы действий, реализация которых позволяет обеспечить ЭМО.

Обобщённый анализ ЭЭС общего назначения показал, что выполнение соответствующих требований к 1-му классу показало, что:

- проведены мероприятия по подавлению ЭМП и защите от перенапряжений;
- произведено резервное питание отдельных элементов;
- заземление и экранирование выполнено по требованиям ЭМС;
- погодные условия контролируются, а также одобрены дополнительные средства защиты от разрядов статического электричества.

В свою очередь, проведённые вышеописанные действия не защищают ЭЭС от появления кондуктивных низкочастотных ЭМП в электрических сетях низкого и среднего напряжения, которые распространяются по кабельной продукции.

В ЭЭС необходимо осуществлять непрерывный мониторинг за параметрами КЭ для определения соответствия их условиям на поставку ЭЭ. Однако обнаруживаются многочисленные явления, которые описываются повторением показателей КЭ. Стационарный эргодический процесс – это случайный процесс, который проявляет как стационарность, так и эргодичность. Данный процесс имеет схожесть (повторяемость) физических величин, характеризующих ЭМО в любое время в течение недели (расчётное время), обусловлена однородностью процесса электропотребления.

Рассматриваемые кондуктивные низкоча-

стотные ЭМП, которые приводят к нарушениям уровней ЭМС технических средств, являются случайными событиями [7]. Эти события показывают измеренное значение показателя КЭ в данный момент времени, характеризующее эту помеху. Множество случайных событий формируют поле событий в трёхфазной электрической сети [7].

В стационарном нормальном установившемся режиме отмечаются переходные процессы, которые сопутствуют эксплуатации ЭЭС. Все данные процессы происходят при коммутационных переключениях (отключении и включении) элементов ЭЭС, повышении или понижении мощности электрических нагрузок, а также действий различных регулирующих устройств [1]. Показатели КЭ при данном режиме работы варьируются с вероятностью 0,95 в границах нормально допустимых величин, а также с вероятностью 1,0 – предельно допустимых величин.

При приемлемых значениях показателей КЭ, которые представляют собой усреднённые значения за отчётный период, допускаются без добавления любых поправок, т. е. отсутствует мера зависимости (совместной изменчивости) двух случайных величин. Однако, нужно понимать, что любые электромагнитные процессы в ЭЭС при стандартизированных значениях показателей КЭ независимы от времени проведения измерений. Поэтому при измерении показателя КЭ можно обходиться одной реализацией случайного процесса [1, 4].

Нормированные показатели КЭ представляют собой уровни ЭМС для кондуктивных низкочастотных ЭМП в ЭЭС. При условии выполнения указанных уровней обеспечивается ЭМС электрических сетей систем электроснабжения общего назначения и электрических сетей потребителей электрической энергии (приемников электрической энергии) [1, 4, 7].

Также в данном режиме работы ЭЭС показатели КЭ квалифицируют ЭЭ как товар на различных рынках (формулы 1–7) и касаются специализированных разделов метрологии – квалиметрии, которая исследует вопросы измерения качества продукции [1, 4].

В трехфазных системах электроснабжения характеризуются показатели КЭ, которые в течение определённого временного интервала (168 часов) изменяются в следующих границах:

$$\begin{cases} -0,1U_H = -0,1U_C < \delta U_{(-)}, \\ 0,1U_H = 0,1U_C < \delta U_{(+)}, \end{cases} \quad (1)$$

где U_H – номинальное напряжение;
 U_C – согласованное напряжение [11].

$$\begin{cases} -0,2\Gamma_c < \Delta f_c < 0,2\Gamma_c & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ |\pm \delta f_{n,c}| = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (2)$$

где t – допустимая продолжительность режима ЭЭС, ч;

$$\begin{cases} -1\Gamma_c < \Delta f_c < 1\Gamma_c & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ |\pm \delta f_{n,c}| = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} K_{U(n),n} < K_{U(n),n} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{U(n),n} = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_U < K_{U,n} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{U,n} = 0 & \text{при } t=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} 2\% < K_{2U} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{2U,n} = 0 & \text{при } t_n=168 \text{ ч.}, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} 2\% < K_{0U} & \text{при } t=160 \text{ ч.}, \\ K_{0U,n} = 0 & \text{при } t_n=168 \text{ ч.} \end{cases} \quad (7)$$

Кроме нормального режима работы ЭЭС существует и утяжелённый режим, который появляется при нарушениях параметров, обусловленных снижением качества ЭЭ. Различие электромагнитных процессов, протекающих при нормируемых показателях КЭ и фактических, объясняется изменением параметров колебательного контура мгновенной мощности от источника до потребителя электроэнергии, обладающего ёмкостью, индуктивностью и активным сопротивлением [12].

Возникновение в ЭЭС кондуктивных низкочастотных ЭМП сигнализирует не

только касательно того, что качество ЭЭ не соответствует требованиям к ней как к товару, но и нарушает нормальный режим её работы. ЭЭС работает в утяжелённом режиме. При данном режиме ЭЭС обнаруживаются нарушения уровней ЭМС технических средств для кондуктивных низкочастотных ЭМП. ЭЭС находится в предаварийном состоянии. Она может перейти в аварийный режим работы, если помехоустойчивость сети как технического средства недостаточно велика.

Исходя из этого, кондуктивные низкочастотные ЭМП являются физическими величинами, описывающими электромагнитные процессы в трёхфазных системах, наделены следующими свойствами [7]:

- представляют собой определённые стохастические величины, устанавливаемые путём преобразования результатов обработки изменений приборов-анализаторов качества ЭЭ за определённый временной промежуток согласно нормативно-технической документации;

- представляют определённые параметры ЭМО в ЭЭС (сети низкого и среднего напряжений);

- определяются интегральными функциями распределения теории вероятностей и математической статистики и вероятностью появления за определённый временной промежуток согласно нормативно-технической документации;

- распространяются по кабельной продукции (гальваническая связь) и в силовых трансформаторах (магнитная связь);

- имеет обширную область распространения, зависящую от вида искажённых показателей КЭ.

В нормативно-технической документации не описывается влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на режимы ЭЭС. Это в настоящее время вызывает неопределённость при решении задач перехода к интеллектуальным электрическим сетям по технологии Smart Grid. В связи с этим многое электрооборудование необходимо контролировать на способность выполнять функциональные обязанности.

При совместной эксплуатации таких систем в ЭЭС важным критерием является ЭМС, которая заключается в способности

ТС функционировать в ЭМО, создаваемой другими электроприёмниками, не вызывая при этом встречного мешающего воздей-

ствия. Эти воздействия создают кондуктивные низкочастотные ЭМП, которые нарушают уровни ЭМС (рис. 1).

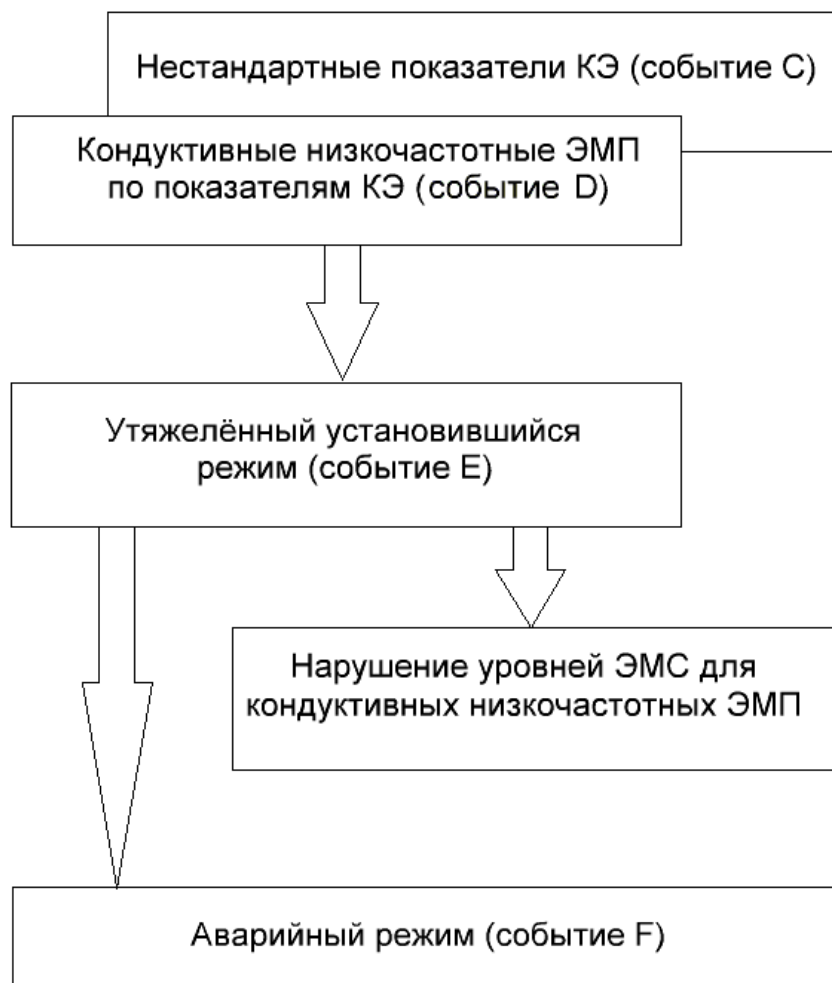


Рис.1. Структурная схема влияния кондуктивных низкочастотных ЭМП на изменения уровней ЭМС ТС и режима работы электрической сети

Fig. 1. Structural diagram of the influence of conductive low-frequency electromagnetic fields on changes in the EMC of technical means and the operating mode of the electrical network

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требуется реализовывать постоянный мониторинг за этими помехами. Нецелесообразно представлять ЭМО в электрических сетях питания ТС только показателями КЭ, необходимо использовать также характеристики, потому что они имеют различные функциональные свойства. При необходимости, согласно ГОСТ 32144–2013, показатели можно регулировать в определённых пределах, а помехи, согласно ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000-2-5-95), необходимо немедленно подавлять специаль-

ми системами, способными ослаблять или устранять влияние помех [13].

В расширяющемся цифровом мире появление кондуктивных низкочастотных ЭМП в системах электроснабжения влечёт за собой снижение надёжности. Перебои менее чем 1/60 секунды достаточны для сбоя работы серверов, компьютеров, систем искусственного жизнеобеспечения, автоматического оборудования и других устройств, работа которых основана на микропроцессорах [2]. Это наблюдается несмотря на то, что современные ЭЭС спроектированы и функционируют по принципу, отвечающему

стандарту надёжности с отказом, например, в США, равным 0,003 %. Это означает, что энергосистема надёжна на 99,997 %.

При переходе к активно-адаптивной (интеллектуальной) ЭЭС обостряется проблема ЭМС технических средств, естественно возрастает необходимость в подавлении кондуктивных низкочастотных ЭМП, так как по определению Smart Grid является концепцией полностью интегрированной, саморегулирующейся и самовосстанавливающейся электроэнергетической системой, имеющей сетевую топологию и включающей в себя все генерирующие источники, магистральные и распределительные сети и все виды потребителей электрической энергии, управляемые единой сетью информационно-управляющих устройств в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Ситников Г.В. Повышение качества функционирования линий электропередачи. Новосибирск : НГАВТ, 2013. 559 с. ISBN 978-4475-5859-8.
3. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электрических системах / под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. Новосибирск : Новосиб. гос. акад. вод. тран., 2006. 432 с.
4. Сальников, В.Г. Руководство по выбору структуры и параметров системы электроснабжения предприятия с мощными сериями электролизёров цветных металлов. Москва : Металлургия, 1985. 78 с.
5. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие. Изд. 2-е. Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. 715 с. ISBN 978-5-222-13221-0.
6. Висящев, А.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетических систе-

мах: учебник для вузов. Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2005. 534 с.

7. Денчик, Ю.М. Определение параметров поля событий в электрических сетях при сложной электромагнитной обстановки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2010. № 2. С. 418-424.
8. ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. Москва : Госстандарт России, 2000. 50 с.
9. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Москва : Наука, 1965. 511 с.
10. Крутов В.И., Глушко И.М., Попов В.В. [и др.] Основы научных исследований: учебник для техн. вузов / под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. Москва : Высш. шк., 1989. 400 с.: ил.
11. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. 10-е изд. Москва : Высш. шк., 1978. 528 с.
12. Сальников В.Г., Иванова Е.В., Кислицин Е.Ю. Несимметрия напряжений в трёхфазных системах как электромагнитная помеха: учебное пособие. Москва : Знание-М, 2022. 94 с.
13. Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в сетях транспортных систем (теория, расчёт, подавление) // Транспортное дело России. 2006. №8. С. 16-20.

REFERENCES

1. GOST 32144-2013. Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Electrical Energy Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems. Moscow : Standartinform, 2014. 16 p.
2. Danilov G.A., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. Improving the performance of power transmission lines. Novosibirsk : NGAVT, 2013. 559 p. ISBN 978-4475-5859-8.

3. Ivanova, E.V. Conductive electromagnetic interference in electrical systems /edited by V.P. Gorelov, N.N. Lizalek. Novosibirsk : Novosibirsk State Academy of Water Transport, 2006. 432 p.
4. Salnikov, V.G. Guide to selecting the structure and parameters of the power supply system of an enterprise with powerful series of non-ferrous metal electrolyzers. Moscow : Metallurgy, 1985. 78 p.
5. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electric energy: a textbook. 2nd ed. Rostov-na- Donu : Phoenix, 2008. 715 p. ISBN 978-5-222-13221-0.
6. Visyashchev A.N. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for universities. Irkutsk : Irkutsk State Technical University Publishing House, 2005. 534 p.
7. Denchik Yu.M. Determination of parameters of the event field in electrical networks under complex electromagnetic conditions // Scientific problems of transport of Siberia and the Far East. 2010. No. 2. P. 418-424.
8. GOST R 51317.2.5-2000 (IEC 61000-2-5-95) Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Classification of electromagnetic interference at locations of technical equipment. Moscow : Gosstandart of Russia, 2000. 50 p.
9. Smirnov N.V., Dunin-Barkovsky I.V. Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications. Moscow : Nauka. 1965. 511 p.
10. Krutov V.I., Glushko I.M., Popov V.V.[et al.] Fundamentals of Scientific Research: Textbook for Technical Universities / edited by V.I. Krutov, V.V. Popov. Moscow : Higher School, 1989. 400 p.: ill.
11. Bessonov L.A. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical Circuits: Textbook. 10th ed. Moscow : Higher. school. 1978. 528 p.
12. Salnikov V.G., Ivanova E.V., Kislitsin E.Yu. Voltage unbalance in three-phase systems as electromagnetic interference: a tutorial. Moscow : Znanie-M. Publishing House, 2022. 94 p.
13. Ivanova, E.V. Conductive electromagnetic interference in transport system networks (theory, calculation, suppression) // Transport business of Russia. 2006. №8. P. 16-20.

УДК 621.311.22

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_45

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РЕГЕНЕРАТИВНОГО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

METHOD FOR DETERMINING THE AERODYNAMIC MOMENT OF A REGENERATIVE SELF-ROTATING AIR HEATER

©2025

Трошин Сергей Сергеевич, аспирант кафедры промышленной
теплоэнергетики

Troshin Sergey Sergeevich, postgraduate student of the Department of Industrial
Thermal Power Engineering

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: serega.troshin.97@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2989-7800>

Аннотация: Представлена методика аэродинамического расчёта крутящих моментов, создаваемых потоками уходящих газов и воздуха, а также оценка момента сил трения, возникающая в подшипниках. На основании результатов исследования построена зависимость суммарного аэродинамического момента от угла наклона направляющего аппарата.

Ключевые слова: регенеративный воздухоподогреватель, самовращение, направляющие аппараты, угол наклона, электродвигатель, крутящий момент, момент силы трения, эффективность.

Для цитирования: Трошин, С.С. Методика определения аэродинамического момента регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя / С.С. Трошин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 45–52. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_45.

Abstract: The paper presents a methodology for aerodynamic calculation of torque generated by flue gas and air flows, as well as an assessment of friction force moment arising in bearings. Based on the research results, a dependence of the total aerodynamic torque on the guide vane angle has been constructed.

Keywords: regenerative air heater, autorotation, guide vanes, angle of inclination, electric motor, torque, friction force moment, efficiency.

For citation: Troshin, S.S. Method for determining the aerodynamic moment of a regenerative self-rotating air heater / S.S. Troshin // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 45–52. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_45.

ВВЕДЕНИЕ

Регенеративные воздухоподогреватели являются ключевым элементом во многих промышленных процессах, где критически важны высокие температуры и энергоэффективность. Их работа основана на прин-

ципе рекуперации тепла: поток горячих газов нагревает специальную насадку, которая затем отдаёт накопленное тепло холодному воздуху. Этот циклический процесс обеспечивает высокоэффективный теплообмен.

По сравнению с традиционными конструкциями, регенеративные воздухоподо-

греватели обладают рядом существенных преимуществ, включая более полное использование тепловой энергии, снижение вредных выбросов, повышение общей эффективности установки и стабилизацию температурного режима, что положительно сказывается на надёжности системы и позволяет экономить топливо.

В данной статье предлагается модель самовращающегося регенеративного воздухоподогревателя. Её основная идея – частичный отказ от использования электропривода для вращения ротора. Вместо этого для его вращения предлагается использовать кинетическую энергию самих потоков сред (уходящих газов и воздуха), которые направляются на лист насадки воздухоподогревателя под определённым углом. Данное техническое решение, основанное на использовании кинетической энергии потоков уходящих газов и воздуха, является уникальным и позволяет достичь ряда значительных преимуществ. Наиболее очевидным из них является прямая экономия электроэнергии, которая ранее в больших объёмах расходовалась на питание мощного электродвигателя.

УСТРОЙСТВО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Прототипом является вращающийся регенеративный воздухоподогреватель, описанный в [3, С. 98]. Этот воздухоподогреватель состоит из цилиндрического ротора, закреплённого на валу и разделённого на секторы при помощи перегородок. Внутри каждого сектора находится набивка (теплообменная поверхность). Ротор крутится внутри неподвижного цилиндрического кожуха, к которому подключены газоходы для подачи и отвода греющего и нагреваемого воздуха.

Для обеспечения процесса вращения (самовращения) воздухоподогревателя предлагается установка направляющих аппаратов внутри газоходов на выходе воздуха и дымовых газов в регенеративный воздухоподогреватель.

В предлагаемом воздухоподогревателе в существующие газоходы для входа воздуха

и дымовых газов устанавливаются направляющие аппараты, представляющие собой перегородки, жёстко фиксированные под углом к оси вращения ротора. При этом входные потоки воздуха и газов направлены в противоположные стороны по параллельным друг другу прямым, что обеспечивает равномерное вращательное движение за счёт сопоставимого воздействия на ротор со стороны обеих сред. Расположение перегородок направляющего канала под углом к оси ротора позволяет обеспечить наклонное воздействие потоков сред на теплообменную поверхность, находящуюся в рабочих секторах. Наклонное воздействие потоками уходящих газов и воздуха создаёт крутящий момент и обеспечивает вращение ротора на валу при отключенном электродвигателе или его отсутствии.

На рис. 1 представлены треугольники скоростей до и после направляющего аппарата.

ПРИНЦИП РАБОТЫ САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Самовращающийся регенеративный воздухоподогреватель содержит вал (1), на котором закреплён цилиндрический ротор (2), вращающийся в неподвижном кожухе (3). Ротор разделён радиальными перегородками на рабочие секторы (11), внутри которых уложена набивка в виде секции (поверхность теплообмена). Основания цилиндрического кожуха закрыты верхней (4) и нижней (5) крышками. В крышки вварены газоходы для входа (6) и выхода (7) воздуха, а также для входа (8) и выхода (9) дымовых газов. Внутри входных газоходов (6) и (8) устанавливается направляющий аппарат с жёстко закреплёнными перегородками (12) и (13), обеспечивающий движение входных потоков сред под углом к оси ротора. Для предотвращения взаимных перетоков сред на внутренних сторонах отдельных секторов на верхней и нижней крышках установлены уплотнения (10).

Работа самовращающегося регенеративного воздухоподогревателя осуществляется следующим образом. Поток дымовых газов через газоход (8), вваренный в крышку (4),

проходя через направляющий аппарат (12), меняет направление своего движения и поступает в рабочие секторы ротора (2) под углом к оси вращения вала (1). Поток воздуха, прошедший через газоход (6), вварен-

ный в крышку (5), и направляющий аппарат (13), поступает в рабочие секторы ротора (2) в направлении, противоположном движению дымовых газов, под тем же углом к оси вращения ротора, что и дымовые газы.

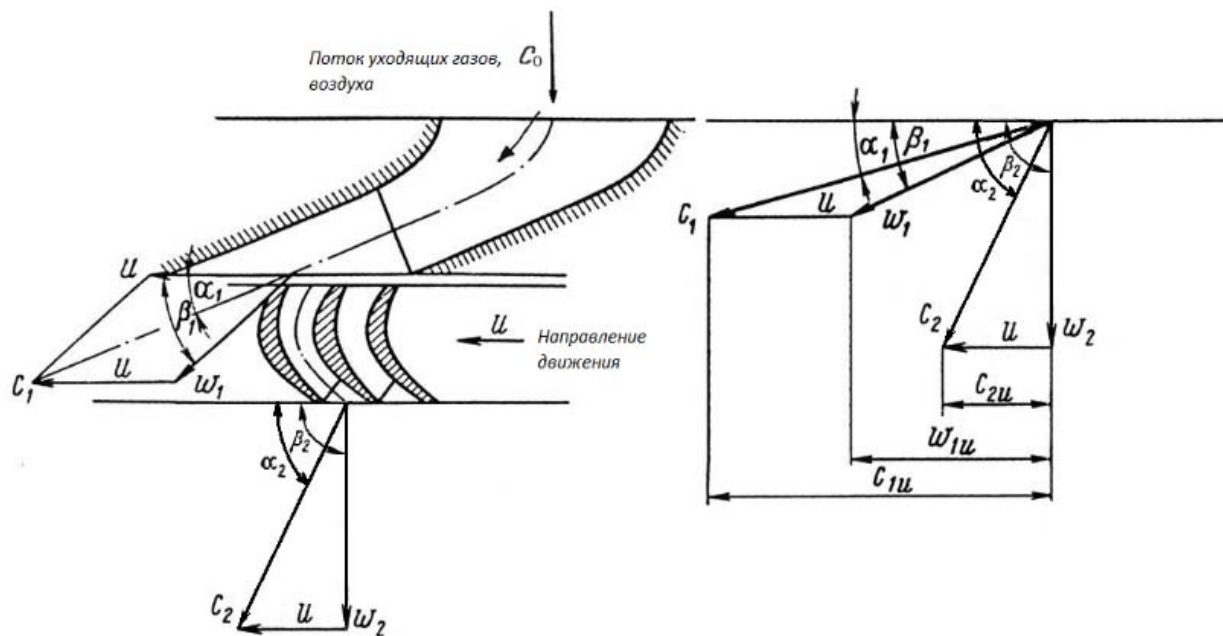


Рис. 1. Треугольники скоростей до и после направляющего аппарата
Fig. 1. Velocity triangles before and after the guide vane

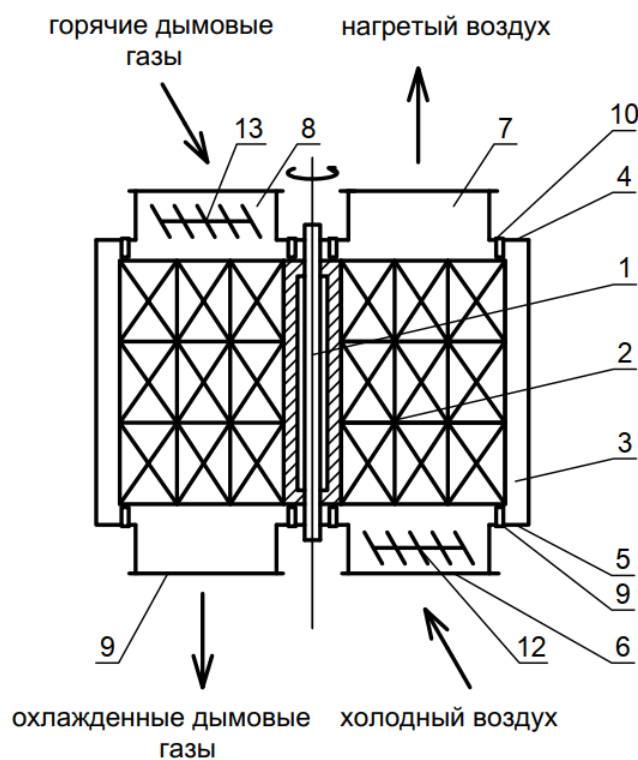


Рис. 2. Самовращающийся регенеративный воздухоподогреватель
Fig. 2. Regenerative self-rotating air heater

Равномерное и непрерывное движение сред обеспечивает вращение ротора с постоянной частотой.

Набивка в виде секции (теплообменная поверхность) попеременно омывается движущимися в противоположном направлении теплоносителями, при этом осуществляется передача теплоты от продуктов сгорания воздуха.

Выход дымовых газов осуществляется через наклонный газоход (9), вваренный в крышку (5), выход воздуха – через газоход (7), вваренный в крышку (4). Выход сред из регенеративного теплообменника осуществляется в направлении, параллельном оси вращения ротора.

На рис. 2 схематично изображено устройство регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается регенеративный вращающийся воздухоподогреватель РВВ-41М, представляющий собой теплообменный аппарат регенеративного типа с вращающимся ротором. Конструктивно воздухоподогреватель состоит из следующих элементов:

- цилиндрического ротора диаметром $D = 4,1$ м, высотой $h = 2,25$ м и массой $m = 41,7$ т;
- теплообменной набивки, расположенной в камере регенерации, попеременно нагреваемой уходящими газами и охлаждаемой воздухом;
- системы подводящих и отводящих газоходов (воздуховодов), обеспечивающей раздельное движение уходящих газов и воздуха;
- подшипниковых опор (верхняя опора – роликовый радиально-сферический двухрядный подшипник (тип 3652), нижняя опора – упорно-радиальный роликовый сферический подшипник (тип 9039452));
- приводной системы, представляющей собой электродвигатель мощностью $P = 11$ кВт, обеспечивающий номинальную частоту вращения $n = 2$ об/мин.

Для обеспечения самовращения предлагается установка направляющих аппаратов в существующие газоходы (воздуховоды) на входе воздуха и дымовых газов. Направляющие аппараты представляют собой перегородки, жёстко фиксированные под углом α к оси вращения ротора, обеспечивающие наклонное воздействие потоков сред на теплообменную поверхность, создание крутящих моментов $M_{\text{газ}}$ и $M_{\text{воз}}$ за счёт преобразования осевой скорости потока в окружную.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА РЕГЕНЕРАТИВНОГО САМОВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Сила, действующая на направляющий аппарат, определяется изменением количества движения потока:

$$F = \dot{m} \cdot \Delta W, \quad (1)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход, кг/с; ΔW – изменение касательной составляющей скорости потока, м/с.

Массовый расход потоков уходящих газов и воздуха:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho, \quad (2)$$

где Q – расход дымовых газов и воздуха, м³/с; ρ – плотность потоков сред, кг/м³.

Касательная скорость, сообщаемая потоку направляющим аппаратом:

$$W_{\text{кас}} = W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha), \quad (3)$$

где $W_{\text{ос}}$ – осевая скорость потока, м/с; α – угол установки направляющих аппаратов.

Осевые скорости потоков сред:

$$W_{\text{ос}}^{\text{газ}} = Q_{\text{газ}} \div f_{\text{газ}}, \quad (4)$$

$$W_{\text{ос}}^{\text{воз}} = Q_{\text{воз}} \div f_{\text{воз}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{газ}}$ и $Q_{\text{воз}}$ – расходы дымовых газов и воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; $f_{\text{газ}}$ и $f_{\text{воз}}$ – площади сечения газохода (воздуховода) на входе в ротор воздухоподогревателя, м^2 .

Крутящие моменты, возникающие от потоков уходящих газов и воздуха:

$$M_{\text{газ}} = \dot{m}_{\text{газ}} \cdot W_{\text{кас}}^{\text{газ}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (6)$$

$$M_{\text{воз}} = \dot{m}_{\text{воз}} \cdot W_{\text{кас}}^{\text{воз}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (7)$$

где $R_{\text{прил}}$ – радиус приложения действующих сил, м.

Суммарный аэродинамический момент, возникающий при вращении ротора:

$$M_{\text{аэр}} = M_{\text{газ}} + M_{\text{воз}}, \quad (8)$$

где $M_{\text{газ}}$ и $M_{\text{воз}}$ – крутящие моменты сред уходящих газов и воздуха, Н·м.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА С УЧЁТОМ ОКРУЖНОЙ СКОРОСТИ

При вращении ротора воздухоподогревателя с окружной скоростью U , относительная скорость потока, создающая касательную силу, уменьшается. Тогда относительная касательная скорость для уходящих газов и воздуха будет вычисляться по формуле:

$$W_{\text{кас}}^{\text{реал}} = W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha) - U, \quad (9)$$

где $W_{\text{ос}}$ – осевая скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; α – угол установки направляющих аппаратов; U – окружная скорость, $\text{м}/\text{с}$.

Окружная скорость, возникающая в результате вращения ротора воздухоподогревателя:

$$U = \pi \cdot D \cdot n / 60, \quad (10)$$

где D – диаметр ротора барабана, м; n – частота вращения, $\text{об}/\text{мин}$.

Сила, действующая на направляющий аппарат с учётом окружной скорости U :

$$F_{\text{реал}} = \dot{m} \cdot (W_{\text{ос}} \cdot \tan(\alpha) - U). \quad (11)$$

Тогда реальные аэродинамические моменты газов и воздуха будут равны:

$$M_{\text{реал}}^{\text{газ}} = F_{\text{реал}}^{\text{газ}} \cdot R_{\text{прил}}, \quad (12)$$

$$M_{\text{реал}}^{\text{воз}} = F_{\text{реал}}^{\text{воз}} \cdot R_{\text{прил}}. \quad (13)$$

Суммарный реальный аэродинамический момент, возникающий в результате вращения ротора воздухоподогревателя:

$$M_{\text{реал}}^{\text{аэр}} = M_{\text{реал}}^{\text{газ}} + M_{\text{реал}}^{\text{воз}}. \quad (14)$$

Установившаяся частота вращения ротора будет достигаться при условии:

$$M_{\text{реал}}^{\text{аэр}} > M_{\text{тр}}. \quad (15)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СИЛ ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

Для оценки момента силы трения в роликовых подшипниках используется формула:

$$M_{\text{тр}} = 0,5 \cdot \mu \cdot F \cdot d, \quad (16)$$

где μ – коэффициент трения; F – нагрузка на подшипник, Н; d – диаметр цапфы (внутренний диаметр подшипника), м.

Осевая нагрузка на упорный нижний подшипник:

$$F_{\text{ос}} = m \cdot g, \quad (17)$$

где m – масса ротора, кг; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Радиальная нагрузка распределена между подшипниками. Для оценки примем суммарную радиальную нагрузку 20 % от осевой:

$$F_{\text{рад}} = 0,2 \cdot F_{\text{ос}} \quad (18)$$

Суммарный момент силы трения складывается из суммы моментов сил трения нижней и верхней опоры подшипников:

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{тр}}^{\text{верх}} + M_{\text{тр}}^{\text{ниж}} \quad (19)$$

Для начала вращения и его поддержания необходимо, чтобы суммарный аэродинамический момент превышал суммарный момент силы трения:

$$M_{\text{аэр}} > M_{\text{тр}} \quad (20)$$

Дополнительно оценить запас по моменту можно по формуле:

$$K_{\text{зап}} = \frac{(M_{\text{аэр}} - M_{\text{тр}})}{M_{\text{тр}}} \cdot 100\% \quad (21)$$

Данная методика позволяет оценить возможность самовращения регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя в условиях реальной работы.

ЗАВИСИМОСТЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ОТ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА НАКЛОНА НАПРАВЛЯЮЩИХ АППАРАТОВ

Концепция самовращения регенеративного вращающегося воздухоподогревателя (РВП) основана на преобразовании части кинетической энергии потоков теплоносителей в механическую работу вращения ротора. Ключевым элементом такой системы являются направляющие аппараты, устанавливаемые во входных трактах воздуха и уходящих газов. Угол наклона направляющих аппаратов к оси вращения ротора α непосредственно определяет эффективность преобразования энергии и величину создаваемого крутящего момента.

Крутящий момент $M_{\text{кр}}$, создаваемый одним потоком, в первом приближении описывается уравнением:

$$M = \dot{m} \cdot \Delta W \cdot R, \quad (22)$$

где $\dot{m}$ – массовый расход, кг/с; ΔW – изменение касательной составляющей скорости потока, м/с; R – плечо приложения силы.

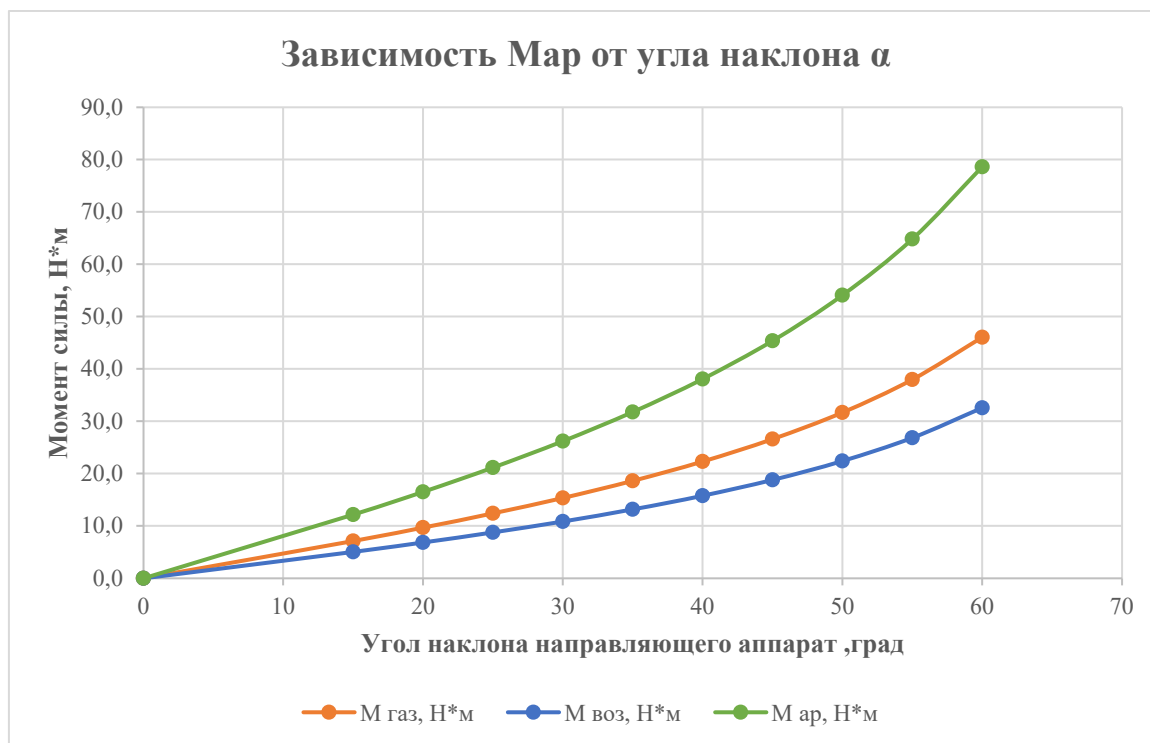


Рис. 3. Зависимость момента силы от угла наклона направляющего аппарата
Fig. 3. Dependence of torque on the guide vane inclination angle

Таким образом, идеальный крутящий момент прямо пропорционален тангенсу угла наклона:

$$M_{ид} \sim \tan(\alpha). \quad (24)$$

При неподвижном роторе при $n = 0$ направляющий аппарат, установленный под углом α , отклоняет осевой поток со скоростью $W_{ос}$. Касательная составляющая скорости, которую приобретает поток, равна:

$$\Delta W_{ид} = W_{ос} \cdot \tan(\alpha). \quad (23)$$

Эта зависимость является фундаментальной: увеличение угла α приводит к росту крутящего момента. Однако её справедливость ограничена диапазоном углов примерно до 60° , после чего резко растут аэродинамические потери и сопротивление.

При вращении ротора с окружной скоростью U точка на роторе воздухоподогревателя уже движется. Эффективная разность скоростей, определяющая силу, равна:

$$\Delta W_{реал} = W_{ос} \cdot \tan(\alpha) - U. \quad (25)$$

Следовательно, реальный крутящий момент с ростом частоты вращения n уменьшается по линейному закону, пока не достигнет нуля при $U = W_{ос} \cdot \tan(\alpha)$. Это накладывает второе важное ограничение: для каждой конфигурации потока и угла α существует теоретический предел частоты вращения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате на рис. 3 представлена зависимость аэродинамического момента от угла наклона направляющего аппарата. За счёт использования кинетической энергии потоков уходящих газов и воздуха данное техническое решение позволяет добиться заметной экономии электроэнергии. Ранее эти объёмы энергии расходовались на обеспечение работы мощного электродвигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакластов А.М., Гробенко В.А., Данилов О.Л. Промышленные тепломассообменные процессы и установки. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 328 с.
2. Бельский А.П., Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях : учебное пособие. Санкт Петербург : СПб ГТУРП, 2012. 136 с. ISBN 978-5-91646-044-5.
3. Боткач И.А. Регенеративные воздухоподогреватели парогенераторов. Москва : Машиностроение, 1978. 175 с.
4. Иванов П.С., Петров М.Г. Теплообменные аппараты энергетических установок / 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 2018. 456 с.
5. Кузнецов В.М., Николаев С.А. Энергосберегающие технологии и теплоэнергетике // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. № 2 (124). С. 23-29.
6. Михайлов Е.Н. Расчёты моментов трения в подшипниковых узлах тяжёлого оборудования // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 34-38.
7. Петров К.Д. Аэродинамика вращающихся аппаратов // Теплоэнергетика. 2020. № 4. С. 45-52.
8. Сидоров А.В. Регенеративные воздухоподогреватели паровых котлов: теория и расчёт. Санкт Петербург : Политехника, 2019. 312 с.
9. Смирнов Г.А. Современные системы уплотнений вращающегося оборудования // Промышленная энергетика. 2022. № 3. С. 28-34.

REFERENCES

1. Baklastov A.M., Grobenko V.A., Danilov O.L. Industrial Heat and Mass Transfer Processes and Installations. Moscow : Energoatomizdat, 1986. 328 p.
2. Belsky A.P., Lakomkin V.Yu., Smorodin S.N. Energy Savin in Thermal Power Engineering and Heat Technologies : Texbook. Saint Petersburg : SPb GTURP,

2012. 136 p. ISBN 978-5-91646-044-5.
3. Botkach I.A. Regenerative of Steam Generators. Moscow : Mashinostroenie, 1978. 175 p.
4. Ivanov P.S., Petrov M.G. Heat Exchangers of Power Plants / 3rd ed., revised and enlarged. Moscow : Energoatomizdat, 2018. 456 p.
5. Kuznetsov V.M., Nikolaev S.A. Energy-saving technologies in thermal power engineering // Energy Saving and Water Treatment. 2021. № 2 (124). P. 23-29.
6. Mikhailov E.N. Calculations of friction torques in bearing units of heavy equipment // Bulletin of Mechanical Engineering. 2019. № 7. P. 34-38.
7. Petrov K.D. Aerodynamics of rotating apparatuses // Thermal Power Engineering. 2020. № 4. P. 45-52.
8. Sidorov A.V. Regenerative Air Heaters of Steam Boilers: Theory and Calculation. Saint Petersburg : Polytechnica, 2019. 312 p.
9. Smirnov G.A. Modern sealing systems for rotating equipment // Industrial Power Engineering. 2022. № 3. P. 28-34.

УДК: 622.532

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_53

СОВРЕМЕННЫЕ НАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ: ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

MODERN PUMPING SYSTEMS FOR MINING ENTERPRISES: ENERGY EFFICIENCY, AUTOMATION AND POWER QUALITY CONTROL

©2025

Гуриева Евгения Владимировна, кандидат технических наук, доцент
кафедры горного дела

Хугаева Гульнара Нодаровна, кандидат технических наук, доцент кафедры
горного дела

Gurieva Evgeniya Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant
Professor of the Mining Department

Khugaeva Gulnara Nodarovna, Candidate of Technical Sciences, Assistant
Professor of the Mining Department

Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ (Россия)
North Caucasus Mining and Metallurgical Institute, Vladikavkaz (Russia)

E-mail: gurievayevgeniya@mail.ru

E-mail: khugaeva1986@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу современных насосных установок для горнодобывающих предприятий. Рассматриваются особенности эксплуатации центробежных насосов в условиях перекачки абразивных гидросмесей и химически агрессивных сред. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности и автоматизации насосного оборудования. Представлены результаты мониторинга качества электроэнергии, выявившие значительные гармонические искажения в сетях электроснабжения. Проанализированы современные материалы и технологии, повышающие надежность и долговечность насосов. Описаны перспективные направления развития насосных систем, включая использование цифровых двойников и систем предиктивного обслуживания. Выявленные проблемы с гармоническими искажениями требуют внедрения специальных фильтрокомпенсирующих устройств. Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание интеллектуальных насосных систем с элементами предиктивного обслуживания и цифровизации, что позволит повысить конкурентоспособность и экологическую безопасность горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: насосное оборудование, несимметрия, качество электроэнергии, автоматизация, гармоники, коэффициент мощности, горное предприятие.

Для цитирования: Современные насосные установки для горнодобывающих предприятий: энергоэффективность, автоматизация и контроль качества электроэнергии / Е.В. Гуриева, Г.Н. Хугаева // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 53–66. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_53.

Abstract: This article analyzes modern pumping systems for mining companies. It examines the operating characteristics of centrifugal pumps handling abrasive hydraulic fluids and chemically aggressive media. Particular attention is paid to energy efficiency and automation of pumping equipment. The article presents the results of power quality monitoring, which revealed significant

harmonic distortions in power grids. Modern materials and technologies that improve pump reliability and durability are analyzed. Promising areas for pumping system development are described, including the use of digital twins and predictive maintenance systems. The identified harmonic distortion issues require the implementation of specialized filter-compensating devices. Further development should be aimed at creating intelligent pumping systems with predictive maintenance and digitalization elements, which will improve the competitiveness and environmental safety of mining companies.

Keywords: pumping equipment, asymmetry, power quality, automation, harmonics, power factor, mining enterprise.

For citation: Modern pumping systems for mining enterprises: energy efficiency, automation and power quality control / E.V. Gurieva, G.N. Khugaeva // *Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region*. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 53–66. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_53.

ВВЕДЕНИЕ

Насосные установки представляют собой неотъемлемый компонент технологических процессов на самых разных промышленных объектах. Их основная задача – транспортировка жидких сред, начиная от обычной воды и заканчивая сложными химическими составами. В металлообработке это могут быть агрегаты для подачи охлаждающих эмульсий, в системах жизнеобеспечения предприятий – насосы для водоснабжения и отведения сточных вод [1, 2]. Особую нишу занимают специализированные модели, предназначенные для работы с агрессивными средами, такие как насосы для перекачки кислот и щелочей в гальванических цехах, а также для перемещения лакокрасочных материалов и пропиточных составов. В контексте горных предприятий требования к насосным установкам многократно возрастают. Здесь они сталкиваются с экстремальными условиями эксплуатации: перекачкой высокоабразивных гидросмесей (пульп), содержащих частицы породы, работой в условиях химически агрессивных сред и необходимостью обеспечения бесперебойного функционирования на большой глубине [3, 4].

Современный рынок строительных материалов и оборудования предлагает решения, отвечающие вызовам XXI века. Производители насосов делают ставку на использование инновационных материалов, таких как износостойкие полимеры, высокопрочные сплавы и керамические покрытия, которые значительно увеличивают ресурс работы узлов, подверженных трению и коррозии [5,

6]. Все большую популярность получают насосы с частотным регулированием привода, которые позволяют гибко управлять производительностью, экономя значительное количество электроэнергии и снижая гидравлические удары в системе. Кроме того, внедрение систем автоматизированного контроля и телеметрии позволяет в реальном времени отслеживать ключевые параметры работы – давление, расход, температуру и уровень вибрации, что переводит техническое обслуживание от планово-ремонтного к предиктивному по фактическому состоянию оборудования. Таким образом, насосные установки являются критически важным элементом инфраструктуры как традиционных промышленных, так и специализированных горнодобывающих предприятий. Их эволюция напрямую связана с общим технологическим прогрессом. Внедрение «умных» и энергоэффективных насосных систем, изготовленных из передовых материалов, – это не просто тренд, а насущная необходимость для повышения конкурентоспособности, безопасности и экологической устойчивости современных производств [7, 8].

ХАРАКТЕРИСТИКА НАСОСОВ

Как показывает практика, установки на основе центробежных насосов (рис. 1) получили наибольшее распространение на горнодобывающих предприятиях. Это объясняется рядом неоспоримых преимуществ. Центробежные насосы обеспечивают равномерную и непрерывную подачу жидкости, обладают относительно простой конструк-

цией, что облегчает их обслуживание и ремонт в полевых условиях, и эффективно работают с загрязненными и абразивными средами. В горном деле это критически важно, так как основная задача насосов –

транспортировка пульпы (смеси воды и твердых частиц породы), осушение шахт и карьеров, а также подача технической воды для технологических процессов.

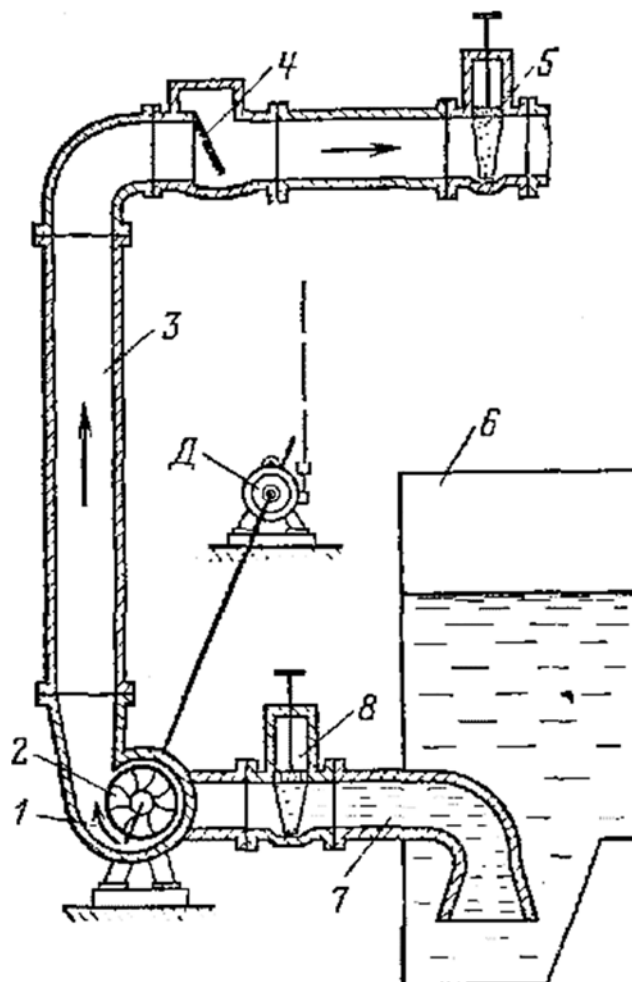


Рис. 1. Общий вид установки с центробежным насосом
Fig. 1. General view of the installation with a centrifugal pump

Конструкция центробежного насоса, являющегося основой насосных установок на горных предприятиях, отличается продуманностью и эффективностью. Её ключевые компоненты включают спиральный корпус (1) и размещенное внутри рабочее колесо (2), оснащенное лопатками. Запуск двигателя приводит рабочее колесо во вращение. Под действием возникающей центробежной силы жидкость, поступающая из заборного резервуара (6) через всасывающий трубопровод (7) и открытую задвижку (8), отбрасывается от центра колеса к периферии корпуса. Этот процесс создает в центральной

зоне колеса область разрежения, что обеспечивает непрерывный подсос новой порции жидкости. Таким образом, при открытой напорной задвижке (5) в системе формируется стабильный и равномерный поток.

Важной особенностью центробежных насосов является их энергопотребление. Мощность, потребляемая двигателем (Р_{дв}), демонстрирует кубическую зависимость от скорости вращения вала (ω), что выражается формулой $P_{дв} = c\omega^3$. Эта характеристика объединяет центробежные насосы с другим динамическим оборудованием, таким как компрессоры и вентиляторы. Данная зави-

симость имеет фундаментальное значение для современных горных предприятий, стремящихся к повышению энергоэффективности. Она наглядно показывает, что даже незначительное снижение частоты вращения насоса, например, за счет использования частотных преобразователей, позволяет добиться существенной экономии электроэнергии, что напрямую снижает себестоимость добычи и переработки полезных ископаемых.

Современные строительные материалы и инженерные решения позволяют значительно повысить надежность центробежных насосов, работающих в экстремальных условиях горного производства. Для изготовления рабочих колес и корпусов все чаще применяются не традиционные чугуны, а высокопрочные износостойкие сплавы, карбид кремния или полиуретановые покрытия. Эти материалы эффективно противостоят абразивному воздействию частиц породы, содержащихся в перекачиваемой пульпе, и коррозии от химически агрессивных шахтных вод. Кроме того, внедрение систем мониторинга вибрации и температуры подшипниковых узлов в режиме реального времени позволяет перейти от планового обслуживания к предиктивному, предотвращая внезапные остановки и сокращая простой дорогостоящего оборудования.

Таким образом, классический принцип действия центробежного насоса, основанный на простой, но эффективной гидродинамике, остается неизменно актуальным. Однако его реализация в оборудовании для горной отрасли XXI века все в большей степени опирается на передовые материалы, системы «умного» управления и энергосберегающие технологии. Это превращает насосную установку из простого механизма перекачки в интеллектуальный узел, отказоустойчивость и экономичность которого напрямую влияют на рентабельность всего предприятия.

В то время как центробежные насосы доминируют в задачах перекачивания больших объемов, поршневые (объемные) насосы находят свою нишу в тех областях горного производства, где требуется создать высокое давление или обеспечить точную дозировку. Например, они незаменимы в

системах гидравлики тяжелой горной техники, для подачи реагентов в процессе обогащения полезных ископаемых, а также для перекачки высоковязких жидкостей, таких как загущенные суспензии или некоторые виды химикатов. Их способность развивать значительное давление независимо от скорости потока делает их идеальными для сложных технологических задач.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

1. Инструментальные измерения электрических параметров.
2. Анализ гармонического состава токов и напряжений.
3. Мониторинг качества электроэнергии.
4. Сравнительный анализ различных типов насосного оборудования.
5. Исследование характеристик современных материалов для насосостроения.
6. Анализ систем автоматизации и управления.

СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

На современных горных предприятиях базовым элементом автоматизации является схема управления насосным агрегатом, обеспечивающая два режима работы: ручной и автоматический. Как показано на рис. 2, а, выбор между ними осуществляется с помощью ключа управления (КУ). При переводе рукоятки КУ в положение «Р» (ручное) управление двигателем (Д) насоса происходит по классической схеме: оператор использует кнопки «Пуск» (КнП) и «Стоп» (КнС), которые через магнитный пускатель (ПМ) подают питание на двигатель. В этом режиме вся ответственность за контроль уровня жидкости в резервуаре и своевременное включение или отключение оборудования лежит на персонале. Важным элементом такой системы является аккумуляторный бак (1), который обеспечивает первоначальную заливку насоса, предотвращая работу «на сухую» и последующие поломки.

Когда ключ управления переведен в положение «А» (автоматический), система кардинально меняет свой принцип работы.

В базовой конфигурации эту функцию выполняют поплавковые выключатели или датчики уровня, установленные в резервуаре. Они самостоятельно отслеживают заданный порог и подают сигнал на пускатель, запуская или останавливая насос без участия оператора. Для горной промышленности, где часто требуется откачка загрязненных шахтных вод или пульпы, такие решения являются первым шагом к повышению безопасности и бесперебойности технологического процесса. Они исключают человеческий фактор и обеспечивают непрерывность операций, таких как осушение карьеров или работа хвостохранилищ.

Современные технологии XXI века трансформируют простейшие схемы автоматизации в элементы комплексных систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУ ТП). Вместо простых датчиков уровня используются многоуровневые системы сбора данных, которые передают информацию на диспетчерский пульт в реальном времени. Современное оборудование позволяет не только включать и выключать насос, но и контро-

лировать его жизненно важные параметры: давление на выходе, температуру подшипников, уровень вибрации и потребляемую мощность. Это позволяет реализовать предиктивное обслуживание, когда система заранее предупреждает о возможной неисправности, минимизируя простой дорогостоящей техники.

Развитие строительных материалов и оборудования движется в сторону создания полностью автономных насосных станций. Перспективным направлением является использование цифровых двойников – виртуальных моделей насосных агрегатов, которые в реальном времени анализируют данные с датчиков и подбирают оптимальные режимы работы для максимальной энергоэффективности и износостойкости. Внедрение частотно-регулируемых приводов позволяет таким системам не просто дискретно включаться и выключаться, а плавно менять производительность в зависимости от текущей технологической необходимости, что обеспечивает значительную экономию ресурсов и продлевает срок службы оборудования горных предприятий.

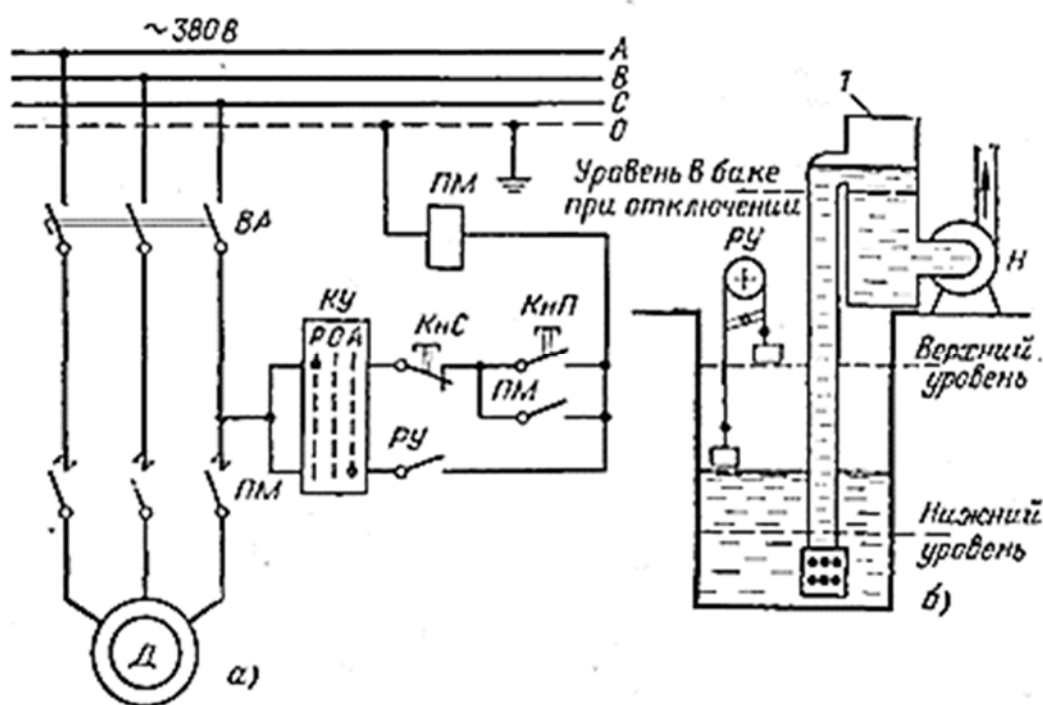


Рис. 2. Автоматизация работы насоса:

а – схема управления двигателем; б – технологическая схема установки

Fig. 2. Automation of pump operation:

a – motor control diagram; b – installation flow chart

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СИСТЕМ ПОДАЧИ РАСТВОРОВ НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Эффективная работа насосных агрегатов, используемых для транспортировки химических реагентов, пульпы и технологических растворов на горно-обогатительных комбинатах, напрямую зависит от стабильности и качества их электроснабжения. Измерение электрических параметров, таких как напряжение, ток, активная и реактивная мощность, – является базовой, но критически важной задачей. Эти данные позволяют не только оценить фактическое энергопотребление оборудования, но и выявить перегрузки, несимметрию фаз и другие отклонения, которые могут привести к преждевременному выходу из строя электродвигателей и, как следствие, к остановке критически важных технологических процессов [9, 10]. Для современных горных предприятий мониторинг качества электроэнергии (КЭ) перестал быть просто технической формальностью и превратился в инструмент экономии ресурсов [11, 12]. Насосные агрегаты с регулируемым электроприводом особенно чувствительны к таким искажениям, как высшие гармоники, провалы и перенапряжения. Низкое качество электроэнергии приводит не только к повышенному нагреву обмоток двигателей и снижению их КПД, но и к сбоям в работе микропроцессорной системы управления, отвечающей за точное дозирование и подачу растворов. Внедрение систем непрерывного мониторинга КЭ позволяет идентифицировать источник помех, минимизировать технологические риски и существенно сократить затраты на электроэнергию за счет оптимизации режимов работы [13, 14].

Проведение регулярного энергоаудита насосных установок с детальным анализом качества электроэнергии является неотъемлемой частью стратегии развития современного горного предприятия. На основе этих данных принимаются решения о внедрении устройств компенсации реактивной мощно-

сти, активных фильтров гармоник и частотных преобразователей. Эти меры не только повышают надежность и долговечность дорогостоящего оборудования для подачи растворов, но и приводят к прямой экономии средств, снижая потери в сетях и исключая штрафы со стороны энергоснабжающих организаций за низкий коэффициент мощности. Таким образом, комплексный мониторинг электрических параметров становится ключевым элементом для построения энергоэффективного и конкурентоспособного производства [15, 16].

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

В рамках исследования энергопотребления на промышленном объекте были проведены инструментальные измерения на группе из пяти насосных агрегатов различного назначения.

Проведенный инструментальный контроль параметров электроснабжения выявил существенные отклонения от нормированных показателей качества электроэнергии в цепях питания насосных установок. Анализ полученных данных позволяет установить, что ключевым источником генерации высших гармоник и несинусоидальности напряжения является эксплуатация мощного технологического оборудования с нелинейным характером нагрузки в электролитном производстве [17, 18].

Такое оборудование, как вентильные преобразователи и индукционные печи, генерирует в сеть высшие гармонические составляющие тока и напряжения, что приводит к повышенному нагреву обмоток электродвигателей, сбоям в работе систем управления и значительному сокращению срока службы электрооборудования. Это создает прямую угрозу надежности критически важных процессов водоподготовки и подачи технологических растворов. Для проведения всестороннего анализа энергоэффективности насосных установок были систематизированы ключевые электротехнические параметры (табл. 1).

Значения мощности, расхода электроэнергии, коэффициента мощности

Table 1

Power values, energy consumption, power factor

Время	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	W, Вач	Wa, Втч	Wp, Варч	cosf
11:34:00	31,45	24,3	19,96	0	0	0	0,77
11:34:05	31,43	24,26	19,98	43,65	33,69	27,75	0,77
11:34:10	31,37	24,21	19,94	87,22	67,32	55,45	0,77
11:34:15	31,42	24,27	19,95	130,86	101,03	83,16	0,77
11:34:20	31,4	24,23	19,96	174,47	134,68	110,88	0,77
11:34:25	31,37	24,21	19,94	218,04	168,31	138,57	0,77
11:34:30	31,31	24,16	19,92	261,53	201,86	166,24	0,77
11:34:35	31,35	24,21	19,93	305,07	235,49	193,92	0,77
11:34:40	31,37	24,23	19,92	348,64	269,14	221,59	0,77
11:34:45	31,33	24,2	19,91	392,15	302,75	249,24	0,77
11:34:50	31,31	24,16	19,91	435,64	336,31	276,89	0,77
11:34:55	31,35	24,21	19,9	479,18	369,93	304,53	0,77

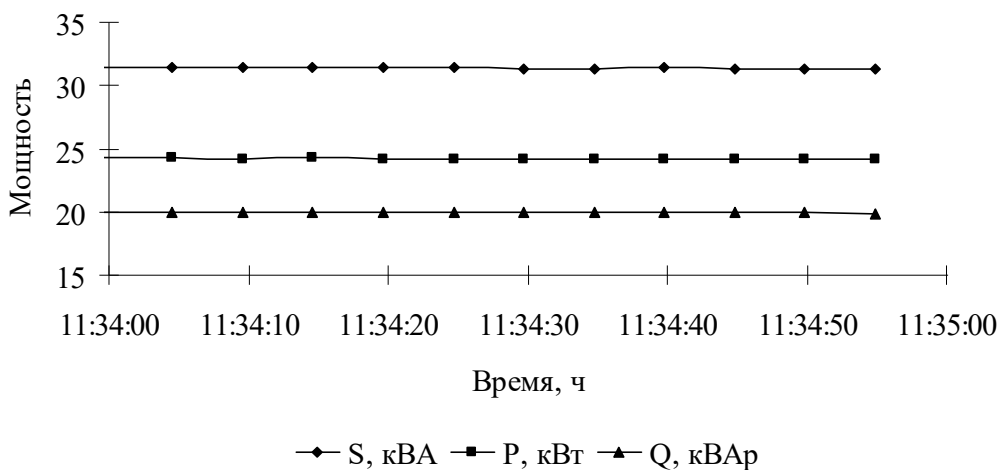


Рис. 3. Характер изменения мощностей во времени

Fig. 3. The nature of changes in power over time

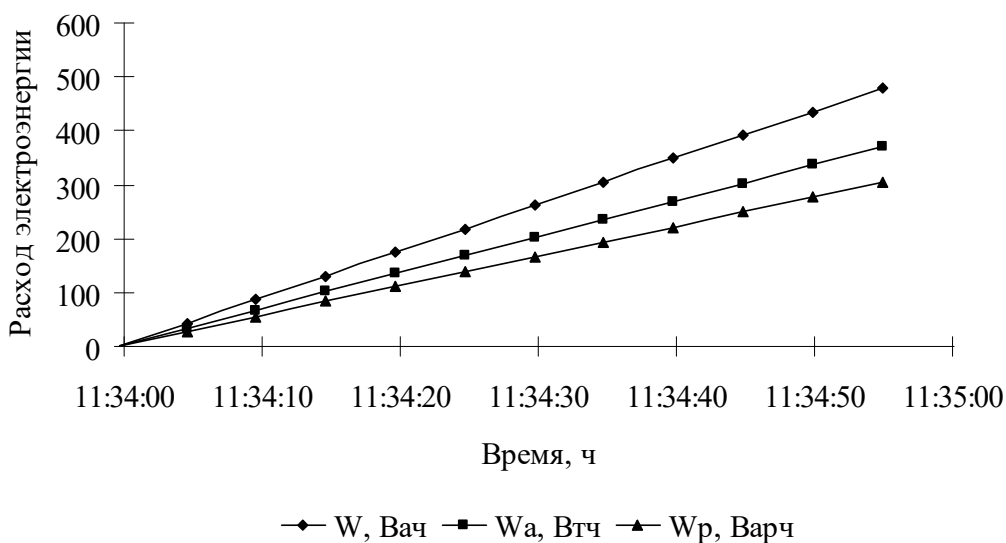


Рис. 4. Изменение расхода электроэнергии во времени

Fig. 4. Changes in energy consumption over time

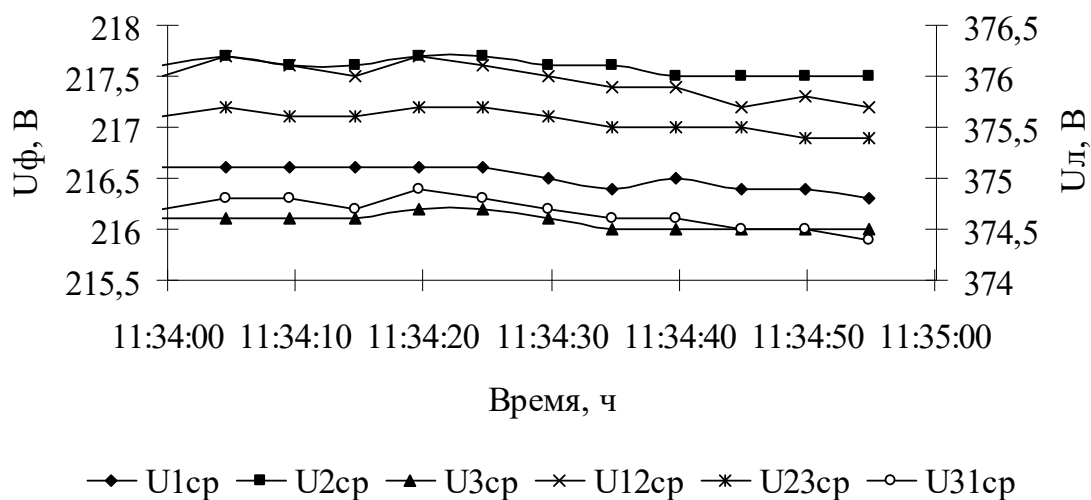


Рис. 5. Изменение фазных и линейных напряжений

Fig. 5. Change in phase and line voltages

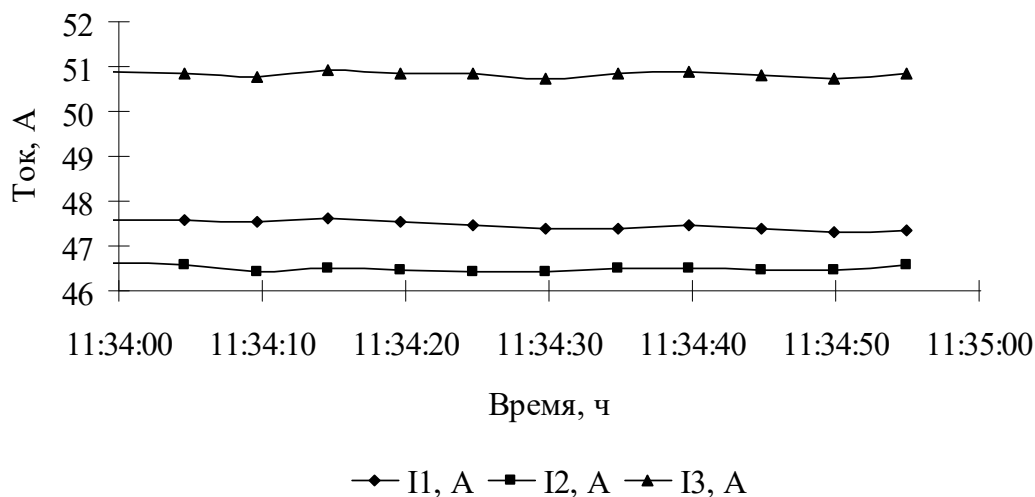


Рис. 6. Изменение фазных токов

Fig. 6. Change of phase currents

В табл. 1 представлены расчетные и измеренные значения мощностей: активной (P), отвечающей за полезную работу, реактивной (Q), создающей электромагнитные поля в оборудовании и носящей индуктивный характер, и полной (S). Помимо мощностных характеристик, в табл. 1 приведены данные о фактическом расходе электроэнергии. Это значения активной (W), реактивной (W_p) и полной (W_a) потребленной энергии за определенный период. Ключевым обобщающим показателем, также отраженным в таблице, является средневзвешенный коэффициент мощно-

сти ($\cos \phi$). Этот интегральный параметр наглядно демонстрирует, какая доля полной мощности преобразуется в полезную работу, а какая тратится на поддержание магнитных полей и является критически важным для оценки потерь в сети и планирования мероприятий по энергосбережению.

Анализ характера изменения мощностей и расхода электроэнергии в течение рассматриваемого периода проводится по графикам, приведенным на рис. 3 и 4.

Графики на рис. 5 демонстрируют динамику средних значений фазных и ли-

нейных напряжений на протяжении анализируемого временного интервала. Параллельно на рис. 6 отображено изменение токовой нагрузки по отдельным фазам.

Проведенный анализ графических данных выявил значительную несимметрию токов в фазах. Средние значения силы тока составили: $I_{1\text{ср}} = 47,5 \text{ А}$, $I_{2\text{ср}} = 46,5 \text{ А}$, $I_{3\text{ср}} = 50,8 \text{ А}$. Данный дисбаланс, при котором ток в третьей фазе существенно

превышает токи в других фазах, является причиной возникновения тока в нулевом проводнике. Результаты измерений показывают, что величина этого тока достигает $4,36 \text{ А}$, что указывает на необходимость проведения мероприятий по балансировке фазной нагрузки для повышения надежности и энергоэффективности системы электроснабжения.

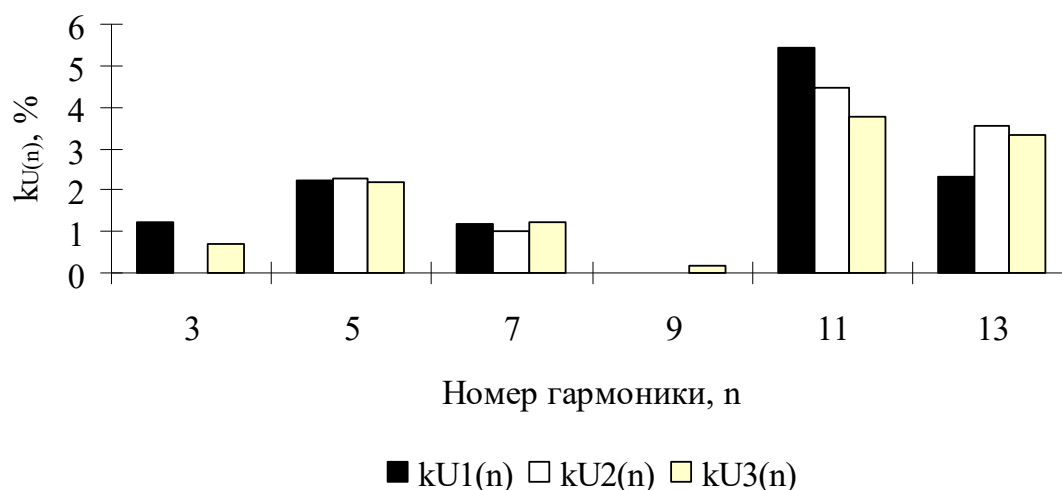


Рис. 7. Гистограмма изменения n-ой гармонической составляющей фазных напряжений
Fig. 7. Histogram of changes in the n-th harmonic component of phase voltages

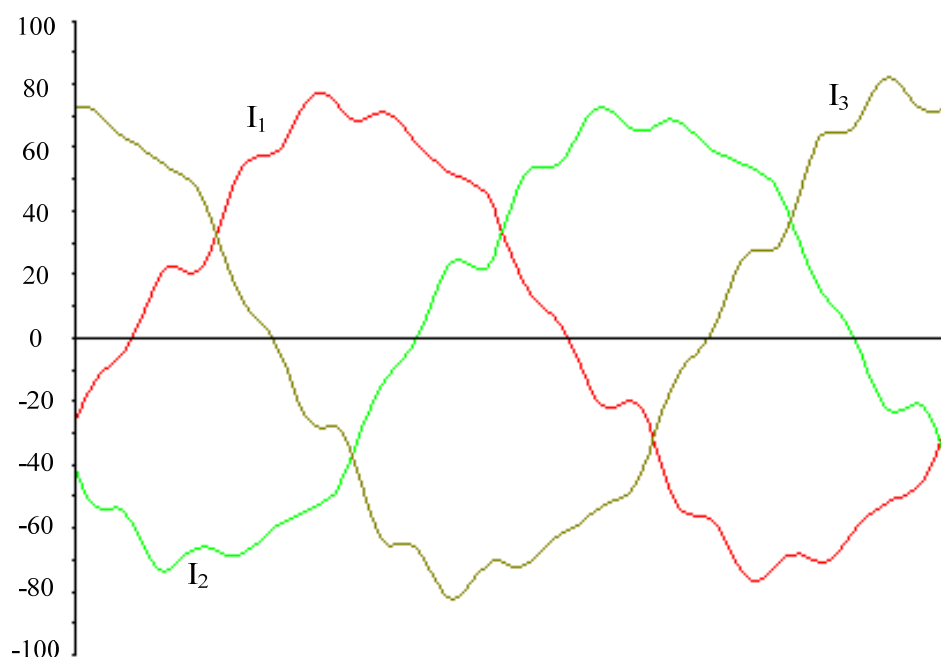


Рис. 8. Осциллограмма изменения фазных токов
Fig. 8. Oscillogram of phase current changes

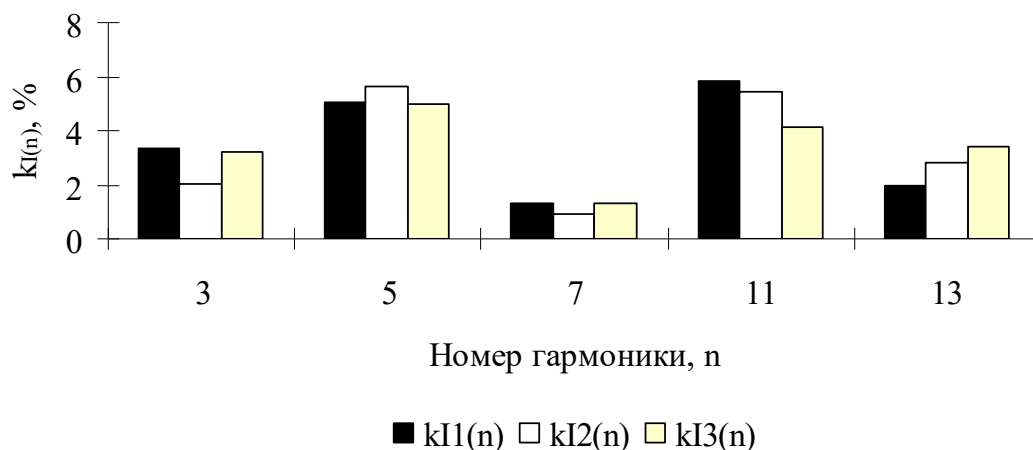


Рис. 9. Гистограмма изменения n-ой гармонической составляющей фазных токов
 Fig. 9. Histogram of changes in the n-th harmonic component of phase currents

Для анализа степени искажения формы напряжения на рис. 7 приведена гистограмма, отображающая значения n-ой гармоники фазных напряжений.

Проведенный анализ гистограммы на рис. 7 позволяет сделать вывод о значительном отклонении формы фазного напряжения от синусоидальной. Данное искажение обусловлено присутствием в спектре сигнала высших гармонических составляющих, а именно 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник. Уровень этих искажений варьируется в диапазоне от 0 до 5,41 %, при этом наиболее существенный вклад в деформацию кривой напряжения вносят 11-я и 13-я гармоники.

Отдельно следует отметить наличие в третьей фазе кратковременной 9-й гармонической составляющей, что указывает на специфический характер нелинейной нагрузки, подключенной к этой фазе.

Суммарное воздействие всех гармоник оценивается коэффициентом несинусоидальности напряжения (K_U), который для отдельных фаз составил следующие значения: $K_{U1} = 6,53$ %; $K_{U2} = 6,19$ %; $K_{U3} = 5,66$ %. Превышение этих показателей над установленными нормами свидетельствует о необходимости разработки и внедрения мероприятий по фильтрации высших гармоник, таких как установка пассивных или активных фильтрующих устройств для

обеспечения требуемого качества электроэнергии и надежной работы оборудования.

Осциллограмма изменения фазных токов показана на рис. 8. Величина n-ой гармонической составляющей в фазных токах визуализирована на гистограмме, представленной на рис. 9.

Согласно данным гистограммы на рис. 9, спектральный состав фазных токов характеризуется наличием высших гармонических составляющих. Во всех трех фазах зафиксированы гармоники порядков 3, 5, 7, 11 и 13. Уровень этих искажений варьируется в значительном диапазоне от 0,95 % до 5,82 % от основной гармоники тока.

Наблюдаемая картина типична для работы мощных нелинейных нагрузок, таких как вентиляльные преобразователи и частотные приводы, которые являются источником характерных нечетных гармоник. Превышение уровней гармонических искажений тока установленных норм приводит к дополнительным потерям в проводниках, перегреву трансформаторов и электродвигателей, а также может вызывать ложные срабатывания устройств защиты. Полученные данные подчеркивают необходимость проведения детального анализа источников гармоник и расчета эффективности применения фильтрокомпенсирующих устройств для снижения негативного

воздействия на систему электроснабжения предприятия [19, 20].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования демонстрируют, что современные насосные установки для горнодобывающих предприятий требуют комплексного подхода к проектированию и эксплуатации. Использование новых строительных материалов и оборудования позволяет значительно повысить надежность и энергоэффективность насосных систем. Технологии XXI века, такие как частотное регулирование, системы автоматизированного управления и мониторинга качества электроэнергии, являются необходимыми элементами современных насосных установок. Выявленные проблемы с гармоническими искажениями требуют внедрения специальных фильтрокомпенсирующих устройств. Дальнейшее развитие должно быть направлено на создание интеллектуальных насосных систем с элементами предиктивного обслуживания и цифровизации, что позволит повысить конкурентоспособность и экологическую безопасность горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.В., Помогаева В.В. Анализ причин отказа работы насосного оборудования при открытом водоотливе. DOI 10.36622/2541-9110.2025.33.2.007 // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2025. № 2 (33). С. 65-75.
2. Карьерные водоотливные установки с путевым отбором воды / А.С. Морин, В.И. Мигунов, К.А. Штреслер, В.Т. Чесноков. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_130 // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 3. С. 130-140.
3. Ключев Р.В. Анализ энергоэффективности и оптимальных режимов работы оборудования горно-обогатительного комбината. DOI 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 157-169.
4. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе / В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, В.И. Комащенко, Ю.И. Разоренов. DOI 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39 // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22, № 6. С. 35-39.
5. Моргоева А.Д., Ключев Р.В., Ляшенко В.И. Прогнозирование нагрузки на электросеть как способ эффективного управления потреблением электрической энергии. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4 (66). С. 39-51.
6. Петров В.Л., Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Моделирование электропотребления обогатительной фабрики. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Горный журнал. 2022. № 2. С. 72-76.
7. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16, № 3. С. 895-908.
8. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11, № 2 (42). С. 103-115.
9. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров / В.И. Голик, З.А. Гашимова, М.Ю. Лискова, Ч.Б. Конгар-Сюрюн. DOI 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33 // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 11. С. 28-33.
10. Ключев Р.В. Обоснование решений по повышению энергоэффективности вентиляторных установок и подъемных машин в условиях реконструкции

- рудника «Молибден». DOI 10.17073/2500-0632-2024-10-362 // Горные науки и технологии. 2025. № 10 (1). С. 84-94.
11. Durgayandi R., Narayanan M. Effect of harmonics on reduction of unbalance in three-phase four wire composite network. DOI 10.11591/ijeeecs.v30.i1.pp24-32 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2023. Vol. 30, № 1. P. 24-32.
12. Experimental analysis of the high-order harmonic components generation in few-layer graphene / A.I. Hadarig, C. Vazquez, M. Fernandez [et al.]. DOI 10.1007/s00339-014-8739-y // Applied Physics A. Materials Science & Processing. 2015. Vol. 118. P. 83-89.
13. Kovernikova L.I., Luong V.Ch., Ngo V.C. Specific features of harmonic conditions at the node connecting a pulp-and-paper mill to a supply network // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. T. 13, № 1. P. 38-51.
14. Diabatic mechanisms of higher-order harmonic generation in solid-state materials under high-intensity electric fields / T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, K. Tanaka. DOI 10.1103/PhysRevLett.116.016601 // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 01660.
15. Ключев, Р.В. Моделирование и оптимизация удельного электропотребления основных технологических процессов горнодобывающего предприятия. DOI 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170 // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 4. С. 170-181.
16. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
17. Oprea S.V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
18. Analysis of a predictive mathematical model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.

REFERENCES

1. Grigoriev S.V., Pomogaeva V.V. Analysis of the causes of pumping equipment failure in open drainage. DOI 10.36622/2541-9110.2025.33.2.007 // Housing and utilities infrastructure. 2025. № 2 (33). P. 65-75.
2. Drainage facilities with underway water intake in open pit mines / A.S. Morin, V.I. Migunov, K.A. Shtresler, V.T. Chesnokov. DOI 10.25018/0236_1493_2024_3_0_130 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2024. № 3. P. 130-140.
3. Klyuev R.V. Energy efficiency and optimum performance of mining and processing plants and equipment. DOI 10.25018/0236_1493_2025_7_0_157 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2025. № 7. P. 157-169.
4. Environmental aspects of storing tails of

- ore dressing in a mountain region / V.I. Golik, Yu.V. Dmytrak, V.I. Komashchenko, Yu.I. Razorenov. DOI 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39 // Ecological problems of mining industry. 2018. Vol. 22, № 6. P. 35-39.
5. Forecasting the load on the power grid as a way to effectively manage the consumption of electrical energy / A.D. Morgoeva, I.D. Morgoev, R.V. Klyuev, V.I. Lyashenko. DOI 10.53015/18159958_2021_4_39 // News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region. 2021. № 4 (66). P. 39-51.
 6. Petrov V.L., Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Modeling power use at processing plant. DOI 10.17580/gzh.2022.02.11 // Gornyi Zhurnal. 2022. № 2. P. 72-76.
 7. Zhukovskiy Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. DOI 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908 // Sustainable Development of Mountain Territories. 2024. Vol. 16, № 3. P. 895-908.
 8. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency // Kazan state power engineering university bulletin. 2019. Vol. 11, № 2 (42). P. 103-115.
 9. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits / V.I. Golik, Z.A. Gashimova, M.Yu. Liskova, Ch.B. Kongar-Syuryun. DOI 10.24000/0409-2961-2021-11-28-33 // Occupational Safety in Industry. 2021. № 11. P. 28-33.
 10. Klyuev R.V. Assessment of energy efficiency improvement strategies for ventilation and hoisting systems during the reconstruction of the Molibden mine. DOI 10.17073/2500-0632-2024-10-362 // Mining Science and Technology (Russia) 2025. № 10 (1). P. 8494.
 11. Durgayandi R., Narayanan M. Effect of harmonics on reduction of unbalance in three-phase four wire composite network. DOI 10.11591/ijeecs.v30.i1.pp24-32 // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2023. Vol. 30, № 1. P. 24-32.
 12. Experimental analysis of the high-order harmonic components generation in few-layer graphene / A.I. Hadarig, C. Vazquez, M. Fernandez [et al.]. DOI 10.1007/s00339-014-8739-y // Applied Physics A. Materials Science & Processing. 2015. Vol. 118. P. 83-89.
 13. Kovernikova L.I., Luong V.Ch., Ngo V.C. Specific features of harmonic conditions at the node connecting a pulp-and-paper mill to a supply network // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2020. T. 13, № 1. P. 38-51.
 14. Diabatic mechanisms of higher-order harmonic generation in solid-state materials under high-intensity electric fields / T. Tamaya, A. Ishikawa, T. Ogawa, K. Tanaka. DOI 10.1103/PhysRevLett. 116.016601 // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 016601.
 15. Klyuev R.V. Modeling and optimization of energy intensity of basic flow processes at mines. DOI 10.25018/0236_1493_2025_4_0_170 // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2025. № 4. P. 170-181.
 16. Sokolov A.A., Fomenko O.A., Ignatev I.V. Development of algorithms for control and control of electric power parameters based on information-measuring system data. DOI 10.1088/1742-6596/2176/1/012076 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2176, № 1. P. 012076.
 17. Oprea S.V., Bara A., Ifrim G. Flattening the electricity consumption peak and reducing the electricity payment for residential consumers in the context of smart grid by means of shifting optimization algorithm. DOI 10.1016/j.cie.2018.05.053 // Computers & Industrial Engineering. 2018. Vol. 122. P. 125-139.
 18. Analysis of a predictive mathematical

- model of weather changes based on neural networks / B.V. Malozyomov, N.V. Martyushev, S.N. Sorokova [et al.]. DOI 10.3390/math12030480 // Mathematics. 2024. Vol. 12, № 3. P. 480.
19. Hamed M.M., Ali H., Abdelal Q. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. DOI 10.1016/j.energy.2022.124510 // Energy. 2022. Vol. 255. article 124510.
20. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion / Q. Ji, S. Zhang, Q. Duan [et al.]. DOI 10.3390/math10122148 // Mathematics. 2022. Vol. 10. article 2148.

УДК 519.876.5

DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67

**МНОГОСЦЕНАРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК
РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА****MULTI-SCENARIO OPTIMIZATION UNDER CONDITIONS OF
UNCERTAINTY FOR CRYOGENIC AIR SEPARATION PLANTS**

©2025

Узбеков Руслан Шавкатьевич¹, аспирант кафедры логистики и
экономической информатики**Челноков Виталий Вячеславович²**, доктор технических наук, профессор
кафедры логистики и экономической информатики**Uzbekov Ruslan Shavkatievich¹**, postgraduate student of the Department of
Logistics and Economic Informatics**Chelnokov Vitaly Vyacheslavovich²**, Doctor of Technical Sciences, Professor
of the Department of Logistics and Economic Informatics*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва (Россия)
D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow (Russia)***E-mail: uzbekovruslan01@yandex.ru**¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5843-6951>**E-mail: chelnokov.v.v@muctr.ru**²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3065-9776>

Аннотация: В работе использовано многосценарная оптимизация при проектировании установок для фракционирования воздуха, повышение эффективности которых может быть достигнута модернизацией конструкции и оптимизацией управлением процессом, учитывающей влияние множества факторов риска. Существует несколько неопределенностей, влияющих на оптимальные решения проблем проектирования и эксплуатации криогенных установок.

Получена математическая модель стационарного состояния ректификационной колонны для разделения воздуха, включающая материальные и энергетические балансы для основных узлов (колонны, теплообменники, дроссельные клапаны).

Ключевые слова: многосценарная оптимизация, криогенная установка, фракционирование воздуха, химико-технологический процесс, ректификация, математическая модель, оптимизация управления процессом.

Для цитирования: Узбеков Р.Ш, Челноков В.В. Многосценарная оптимизация в условиях неопределенности для криогенных установок разделения воздуха// Вести высших учебных заведений Черноморья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 67–75. DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67.

Abstract: The work uses multi-scenario optimization in the design of air fractionation plants, the increase in efficiency of which can be achieved by upgrading the design and optimizing process control, taking into account the influence of many risk factors. There are several uncertainties affecting optimal solutions to the problems of designing and operating cryogenic plants.

A mathematical model of the stationary state of a distillation column for air separation has been obtained, including material and energy balances for the main components (columns, heat exchangers, throttle valves).

Keywords: multi-scenario optimization, cryogenic plant, air fractionation, chemical and technological process, rectification, mathematical model, process control optimization.

For citation: Uzbekov R.S., Chelnokov V.V. Multi-scenario optimization under conditions of uncertainty for cryogenic air separation plants// Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 67–75. DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_67.

ВВЕДЕНИЕ

Многосценарная оптимизация (МСО) — метод принятия решений в условиях неопределенности будущего, при котором оптимизация проводится одновременно для нескольких возможных сценариев развития событий с целью найти решение, которое будет надежным и показывать приемлемые результаты в широком спектре этих сценариев, а не только в одном «наиболее вероятном» или «ожидаемом» [1–4]. МСО может быть применено при проектировании химических процессов в условиях неопределенности – на этапах проектирования и эксплуатации [5–7].

В концептуальном проектировании неизвестную информацию можно разделить на две категории [8]:

– эпистемическая неопределенность, вызванная недостатком знаний или данных на текущем этапе («известные неизвестные»), которую, в принципе, можно получить (измерить, уточнить или смоделировать) с приемлемой точностью при выделении достаточных ресурсов (времени, денег, усилий);

– онтологическая неопределенность, присущая самой природе системы или явления («неизвестные неизвестные» или фундаментальная случайность), которую нельзя устранить полностью даже при наличии бесконечных ресурсов, так как она обусловлена внутренней стохастичностью процессов или принципиальной непредсказуемостью будущих событий.

МСО определяется:

$$\begin{aligned} \min_{d,u} f_0(d) + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \omega_{mk} f_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u), \\ \text{s.t. } h_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u) = 0, \\ g_{mk}(d, u_k, l_{mk}, \theta_k^v, \theta_m^u) \leq 0, k \in K, m \in M, \end{aligned}$$

где d , u_k – проектные и управляющие переменные соответственно, l – переменные со-

стояния, g и h – ограничения неравенства и равенства соответственно, K – индекс для дискретных значений переменных параметров θ^v , M – индекс для дискретных значений неизвестных параметров θ^u .

Целевая функция стремится оптимизировать некоторую агрегированную меру производительности по всем сценариям одновременно, исходя из подходов [9–12]:

– минимум ожидаемых затрат / максимум ожидаемой прибыли;

– минимум максимальных затрат, фокусируемый на наихудшем возможном исходе, делая решение крайне консервативным (робастным к худшему сценарию);

– минимум средних затрат с ограничением на максимальные затраты – комбинация ожидаемого значения и защиты от катастроф;

– максимизация надежности — максимизировать вероятность достижения цели или избежания нежелательного исхода.

Предполагается, что управляющие переменные u могут использоваться для компенсации измеряемых переменных параметров, θ^v , но не неопределенности, связанной с неизвестными параметрами, θ^u .

Цель данной работы – повышение эффективности установок для фракционирования воздуха с использованием многосценарной оптимизации управлением процессом, учитывающей влияние разных факторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является криогенная установка для разделения воздуха в условиях неопределенности.

Фракционирование жидкого воздуха криогенными и некриогенными составляющими используется для получения азота, аргона и кислорода высокой чистоты [13]. Некриогенные процессы (адсорбция при переменном давлении, мембранное разделение) стали более конкурентоспособными, но

криогенная дистилляция является доминирующим выбором при получении больших количеств высокочистых газов [14]. Основным недостатком криогенной дистилляции является высокая энергоемкость.

Повышение эффективности может быть связана с двумя составляющими: модернизацией конструкции криогенной системы и оптимизацией, управлением процессом. Остановимся на последней.

Проектирование криогенных установок разделения воздуха в условиях неопределенности — сложная задача, требующая учета множества факторов риска [15, 16]. Существует несколько неопределенностей, влияющих на оптимальные решения проблем проектирования и эксплуатации криогенных установок.

1. Сырье (Воздух):

- колебания состава (влажность, присутствие CO_2 , углеводородов, N_2O);
- характеристики атмосферного воздуха (давление, температура);
- загрязненность (пыль, аэрозоли, промышленные выбросы).

2. Эксплуатационные условия:

- изменчивость нагрузки (спрос на продукты — O_2 , N_2 , Ar);
- изменение стоимости электроэнергии;
- режимы пуска/остановки, переходные процессы.

3. Технологические параметры:

- неточность моделей тепло- и массообмена;
- неопределенность в параметрах материалов (теплопроводность);
- дрейф характеристик оборудования (загрязнение теплообменников).

4. Внешние факторы:

- колебания рынка (спрос/цена на продукты);
- изменения нормативов (экология, безопасность);
- климатические воздействия (температура среды).

В работе применяется методология, интегрирующая математическое моделирование, многокритериальную оптимизацию и сценарный анализ. Строится строгая нелинейная модель технологического процесса, служащая основой для вычисления целевых функций. Для поиска компромис-

са между энергоэффективностью и надёжностью работы используется многосценарная оптимизация. Анализ чувствительности позволяет оценить влияние ключевых неопределённых факторов на конечный результат и идентифицировать наиболее робастные режимные параметры установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Фракционирование воздуха — процесс разделения воздуха на компоненты охлаждением до низких температур и последующей дистилляцией, основанный на различии температур кипения газов: азот (N_2) $-195.8\text{ }^\circ\text{C}$; аргон (Ar) $-185.9\text{ }^\circ\text{C}$, кислород (O_2) $-183.0\text{ }^\circ\text{C}$

Газофракционирующие установки состоят из нескольких основных компонентов:

- ректификационной колонны, где происходит фракционирование;
- резервуаров для хранения продуктов;
- системы охлаждения и нагрева;
- системы контроля и управления процессом.

Типичная криогенная система разделения воздуха включает колонну двукратной ректификации, а при необходимости получения чистого аргона — дополнительную колонну.

На рис. 1 приведена технологическая схема ректификации воздуха.

Поэтапное описание работы ректификационной установки.

1. Подготовка воздуха:

- сжатие: атмосферный воздух компрессором сжимается до высокого давления (обычно 5–6 бар для нижней колонны);
- очистка: сжатый воздух проходит систему очистки для удаления влаги (осушители), углекислого газа (адсорберы), углеводородов (опасны при накоплении в жидком кислороде);
- охлаждение: очищенный воздух охлаждается в теплообменниках (основном противотоке) почти до температуры сжижения, используя холод от выходящих продуктов разделения (азот, кислород).

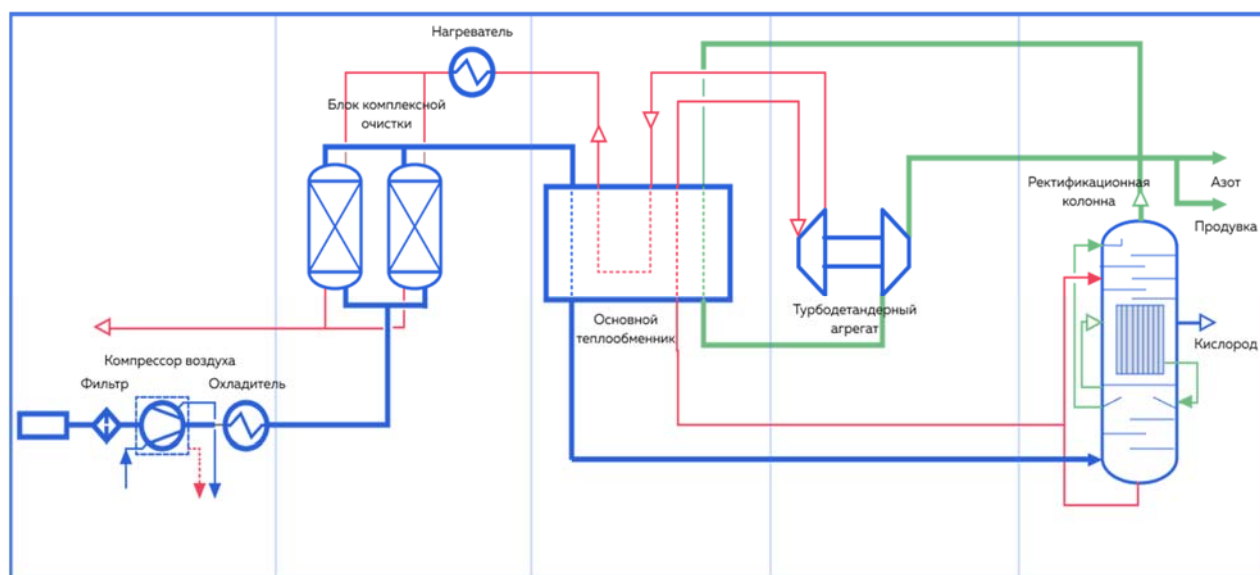


Рис. 1. Технологическая схема ректификации воздуха
Fig. 1. Process flow diagram for air rectification

2. Подача воздуха в нижнюю колонну (колонна высокого давления – КВД):

- охлажденный воздух частично сжижается в теплообменниках;
- воздух под высоким давлением (5–6 бар) подается в середину нижней колонны.

3. Работа КВД.

Колонна необходима для предварительного разделения воздуха на азот (верх колонны) и обогащенную кислородом жидкость (низ колонны).

Воздух поступает на тарелку питания. Из-за снижения давления часть его мгновенно испаряется. Пар (легкокипящая фракция, богатая азотом) поднимается вверх по колонне через отверстия в тарелках (или насадку), жидкость (тяжелокипящая фракция, богатая кислородом) стекает вниз по колонне. На каждой тарелке (или в каждом элементе насадки) пар и жидкость вступают в интенсивный контакт. Более летучий азот испаряется из жидкости, а менее летучий кислород конденсируется из пара. По мере подъема пара концентрация азота возрастает, а по мере стекания жидкости вниз растет концентрация кислорода.

Наверху нижней колонны получается газообразный азот высокой чистоты (99.5–99.9 % N_2), на дне (кубе) нижней колонны – обогащенная кислородом жидкость (30–40 % O_2 , N_2 и Ar), называемая кубовой жидкостью.

Азотный пар поступает в конденсатор, расположенный в верхней части нижней колонны, представляющий собой теплообменник, погруженный в жидкий кислород, находящийся в кубе верхней колонны. Азотный пар конденсируется, отдавая тепло кипящему жидкому кислороду верхней колонны. Часть конденсата (азотная флегма) возвращается в нижнюю колонну как орошение, поддерживая процесс ректификации. Другая часть отводится как жидкий азотный продукт или используется для дальнейшей ректификации.

4. Переток в верхнюю колонну (колонну низкого давления – КНД).

Кубовая жидкость (обогащенная кислородом) из нижней колонны дросселируется (резко снижается давление – до 1.3–1.5 бар), часть жидкости испаряется. Образованная парожидкостная смесь подается в середину верхней колонны.

5. Работа КНД.

В ней происходит окончательное разделение кубовой жидкости на чистый кислород (низ колонны), чистый азот (верх колонны) и отбор аргонной фракции (если требуется).

Принцип работы аналогичен КВД: пар поднимается вверх, жидкость стекает вниз, на контактных устройствах (тарелках/насадке) происходит массо- и теплообмен. По мере подъема пара концентрация

азота растет, а по мере стекания жидкости вниз возрастает содержание кислорода.

Наверху верхней колонны концентрируется газообразный азот (чистота 99.99 % и выше). Часть его используется для регенерации адсорберов очистки воздуха, часть выводится как продукт, часть сжижается.

На дне (кубе) верхней колонны собирается чистый жидкий кислород (99.5–99.8 % O_2), частично выводимый как готовый продукт. Часть испаряется в конденсаторе нижней колонны (обеспечивая холод для конденсации азота КВД), а часть возвращается в колонну для орошения.

Аргон (Ar), имеющий промежуточную температуру кипения между N_2 и O_2 , накапливается в средней части колонны. Для его получения проводят отбор аргонной фракции в зоне максимальной концентрации Ar и подают ее в отдельную аргонную колонну для дальнейшего очищения.

6. Выход продуктов и рекуперация холода.

Газообразные продукты: чистый азот (сверху КНД) и чистый кислород (испарен-

ный из куба КНД) проходят через основной теплообменник (противоток), нагреваясь почти до комнатной температуры, охлаждая входящий сжатый воздух, и направляются потребителям.

Жидкие продукты: кислород, азот (из конденсатора КВД) и аргон (из аргонной колонны) могут отбираться в криогенные емкости для хранения и транспортировки.

Ректификационная колонна (а точнее, система из двух колонн) использует разницу в летучести компонентов воздуха, многократный контакт пара и жидкости на тарелках/насадке, тщательно организованные потоки флегмы и тепла между колоннами, а также рекуперацию холода для эффективного и экономичного разделения воздуха на чистый азот, кислород и аргон в промышленных масштабах.

КНД рассматриваемой ректификационной установки содержит 70 теоретических ступеней разделения, а КВД – 36. Табл. 1 показывает рабочие параметры рассматриваемой установки.

Таблица 1

Основные рабочие параметры для проектирования установки фракционирования воздуха

Table 1

Basic operating parameters for designing an air fractionation plant

Параметры	Значения
Газообразный кислород, моль/с	2.44
Жидкий кислород, моль/с	0.64
Чистота кислорода	$\geq 98 \%$
Газообразный азот, моль/с	13.13
Чистота азота	$\geq 99.99 \%$
Чистота аргона	$\geq 96 \%$
Давление КНД, МПа	0.13–0.14
Давление КВД, МПа	0.68–0.69
Давление аргонной колонны (АК), МПа	0.12–0.13

Математическая модель стационарного состояния ректификационной колонны для разделения воздуха может быть получена с применением предположений:

- полное смешивание на каждой тарелке;
- 100%-ная эффективность тарелки;
- незначительные потери тепла на тарелке;

– постоянный перепад давления на каждой тарелке;

– равномерное давление и температура на каждой тарелке.

Разрабатываемая математическая модель включает материальные и энергетические балансы для двух основных и аргонной ректификационных колонн, двух основных

и двух встроенных теплообменников, дроссельных клапанов.

Массовый баланс трех колонн – высоко-, низкого давлений и аргонового учитывает:

$$F_j^S + F_j^L + V_{j+1} + L_{j-1} - V_j - S_j^S - L_j - S_j^L = 0,$$

где j – индекс каждой тарелки сверху каждой колонны, F_j^S и F_j^L , S_j^S и S_j^L – молярные потоки пара и жидкости, поступающие и выходящие j тарелки, соответственно, V_j и L_j – расходы пара и жидкости.

Массовые балансы компонентов:

$$V_{j+1}Y_{i,j+1} + L_{j-1}X_{i,j-1} + F_j^S Z_{i,j}^S + F_j^L Z_{i,j}^L - (V_j + S_j^S)Y_{i,j} - (L_j + S_j^L)X_{i,j} = 0,$$

где $i \in CP$ – индекс каждого компонента (1 – азот, 2 – аргон, 3 – кислород), составы жидкости и пара задаются как $x_{i,j}$ и $y_{i,j}$ соответственно; $z_{i,j}^S$ и $z_{i,j}^L$ – составы пара и жидкости потоков сырья, поступающих на j тарелку.

Математическая модель энергетического баланса каждой тарелки:

$$V_{j+1}H_{j+1}^S + L_{j-1}H_{j-1}^L + F_j^S Z_j^{FS} + F_j^L Z_j^{FL} - (V_j + S_j^S)H_j^S - (L_j + S_j^L)H_j^L = 0,$$

где H_j^{FS} и H_j^{FL} – энтальпии пара и жидкости сырья, поступающего на соответствующую (j) тарелку, H_j^S и H_j^L – энтальпии пара и жидкости.

$H_{i,j}^{FS}$, $H_{i,j}^{FL}$, $H_{i,j}^S$ и $H_{i,j}^L$ рассчитываются по уравнениям:

$$H_j^S = \sum_{i \in CP} y_{i,j} H_{i,j}^S(T_j, P_j) + \Delta H_{mix}^S(T_j, P_j),$$

$$H_j^L = \sum_{i \in CP} x_{i,j} H_{i,j}^L(T_j, P_j) + \Delta H_{mix}^L(T_j, P_j),$$

$$H_j^{FS} = \sum_{i \in CP} y_{i,j} H_{i,j}^{FS}(T_j^F, P_j^F) + \Delta H_{mix}^{FS}(T_j^F, P_j^F),$$

$$H_j^{FL} = \sum_{i \in CP} x_{i,j} H_{i,j}^{FL}(T_j^F, P_j^F) + \Delta H_{mix}^{FL}(T_j^F, P_j^F),$$

где H_{mix}^{FS} , H_{mix}^{FL} – энтальпии смесового компонента.

Зависимость энтальпий от температуры и давления может быть представлена с использованием полиномиальной подгонки высокого порядка к данным моделирования.

Суммарное уравнение в j тарелке:

$$\sum_{i \in CP} y_{i,j} = 1.$$

Выражения равновесия пар-жидкость для каждой тарелки:

$$y_{i,j} = k_j \gamma_j K_{i,j} x_{i,j} + (1 - k_j) y_{i,j+1},$$

где k_j – эффективность j тарелки по Мэрфи, K – идеальная константа равновесия пар-жидкость, рассчитанная с использованием уравнения Антуана (1), γ – коэффициент активности, рассчитанный с использованием уравнений Маргулеса (уравнения 2 – 4).

Если принимать эффективность тарелки равной 100 %, то составляющей $(1 - k_j) y_{i,j+1}$ можно пренебречь. Тогда:

$$y_{i,j} = \gamma_j K_{i,j} x_{i,j} - 0.$$

Величина константы $K_{i,j}$ определяется выражением:

$$K_{i,j} = \exp \left[\frac{A_i - \left(\frac{B_i}{T_j + C_i} \right)}{P_j} \right]. \quad (1)$$

Соответствующие коэффициенты активности можно рассчитать по уравнениям Маргулеса:

$$\log \gamma_{1,j} = \left(\frac{A_{1,3} x_{3,j}^2 + A_{1,2} x_{2,j}^2 + (A_{1,3} + A_{1,2} - A_{2,3}) x_{3,j} x_{2,j}}{RT_j} \right), \quad (2)$$

$$\log \gamma_{2,j} = \left(\frac{A_{1,2} x_{1,j}^2 + A_{2,3} x_{3,j}^2 + (A_{1,3} + A_{2,3} - A_{1,3}) x_{1,j} x_{3,j}}{RT_j} \right), \quad (3)$$

$$\log \gamma_{3,j} = \left(\frac{A_{1,3} x_{1,j}^2 + A_{2,3} x_{2,j}^2 + (A_{1,3} + A_{2,3} - A_{1,2}) x_{1,j} x_{2,j}}{RT_j} \right), \quad (4)$$

где R – идеальная газовая постоянная, а константы Маргулеса ($A_{i,k}$) описывают взаимодействие жидкой фазы между компо-

нентами i и k . Значения констант Маргулеса и Антуана можно найти в литературе.

Комбинированный конденсатор/ребойлер моделируется как дополнительная тарелка как для КВД, так и для КНД, что определяется выражением:

$$Q_1 = UA_1(T_1^{КВД} - T_{70}^{КНД}) = V_1^{КВД}(H_1^{S,КВД} - H_1^{L,КВД}) = (V_{70}^{КНД} + S_{70}^S)(H_{70}^{S,КНД} - H_{70}^{L,КНД}),$$

где Q_1 – передача энергии от КВД к КНД, UA_1 – коэффициент теплопередачи в конденсаторе/ребойлере, $T_1^{КВД}$ – температура на первой тарелке КВД, а $T_{70}^{КНД}$ – температура на последней тарелке КНД, $V_1^{КВД}$ – поток пара первой тарелки в КВД, который полностью конденсируется Q_1 . Тепло Q_1 выделяется в поток пара $V_{70}^{КНД}$ и поток кислорода S_{70}^S на последней тарелке КНД.

Аналогично, интегрированный по теплу конденсатор АК, моделируется по уравнению:

$$Q_2 = UA_2(T_1^{AK} - T_{O_{2-r}}) = V_1^{AK}(H_1^{S,AK} - H_1^{L,AK}) = \Delta V_{O_{2-r}}(H_{O_{2-r}}^S - H_{O_{2-r}}^L),$$

где T_1^{AK} , $H_1^{S,AK}$ и $H_1^{L,AK}$ — температура, энтальпии пара и жидкости на первой тарелке, V_1^{AK} — поток пара на первой тарелке АК, $T_{O_{2-r}}$ и $\Delta V_{O_{2-r}}$, $H_{O_{2-r}}^S$ и $H_{O_{2-r}}^L$ — температура и объем частично испаренного количества, энтальпии пара и жидкости в потоке, насыщенном кислородом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением многосценарной оптимизации составлена математическая модель криогенной установки для разделения воздуха с учетом некоторых предположений (полное смешивание на каждой тарелке; 100%-ная эффективность тарелки; незначительные потери тепла на тарелке; постоянный перепад давления на каждой тарелке; равномерное давление и температура на каждой тарелке) для двух основных и ар-

гонной ректификационных колонн, двух основных и двух встроенных теплообменников, дроссельных клапанов.

Модель позволит оптимизировать технологический процесс фракционирования воздуха без дорогостоящей реконструкции производства, что, несомненно, скажется на экономической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mora C.A., Orjuela A. Modeling, validation and exergy evaluation of a thermally-integrated industrial cryogenic air separation plant in Colombia. Part II : Optimization under variable products demand. DOI 10.1016/j.cherd.2023.02.009 // Chemical Engineering Research and Design. 2023. № 191. P. 537-551.
2. Multi-scenario data-driven robust optimisation for industrial steam power systems under uncertainty / Y. Han, J. Zheng, X. Luo [et al.]. DOI 10.1016/j.energy.2022.126032 // Energy. 2023. № 263. P. 126032.
3. Multi-Scenario Crop Cultivation Optimization Strategies Based on Linear Programming and Dynamic Programming / G. Lin, M. Zhang, H. Ye, H. Wang. DOI 10.1145/3727993.372801 // CMSDA '24: Proceedings of the 2024 4th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis-2024: CMSDA. 2024. P. 120-128.
4. Фундаментальные знания и гибкость мышления-приоритеты управленческого образования для технологического прорыва / Л.Д. Гительман, А.П. Исаев, М.В. Кожевников, Т.Б. Гаврилова. DOI 10.17747/2618-947X-2022-2-92-107 // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2022. № 13 (2). С. 92-107.
5. The Use of an Optimized Grey Multi-Objective Programming-PLUS Model for Multi-Scenario Simulation of Land Use in the Weigan-Kuche River Oasis, China / K. Dong, Y. Wang, K. Luo [et al.]. DOI 10.3390/land13060802 // Land. 2024. № 13 (6). P. 802.
6. Braniff A., Tian Y. A hierarchical multi-parametric programming approach for dynamic risk-based model predictive quality control. DOI 10.1016/j.conengprac.2024.106062 // Control Engineering Practice. 2024. № 152. С. 106062.

REFERENCES

7. Integrating stochastic programming and reliability in the optimal synthesis of chemical processes / Y. Chen, Y. Ye, Z. Yuan [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. 2022. № 157. P. 107616.
8. Liang Y. Learning from unknown information sources. DOI 10.1287/mnsc.2021.03551 // *Management Science*. 2025. № 71 (5). P. 3873-3890.
9. Gunantara N. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. DOI 10.1080/23311916.2018.1502242 // *Cogent Engineering*. 2018. № 5 (1). P. 1502242.
10. Afsar B., Miettinen K., Ruiz F. Assessing the performance of interactive multi-objective optimization methods: A survey. DOI 10.1145/3448301 // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2021. № 54 (4). P. 1-27.
11. Priyadarshi R. Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-heuristic and Artificial Intelligence-based Approach: A Comprehensive Review. DOI 10.1007/s11831-023-10039-6 // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. № 34 (4).
12. Optimizing federated learning in distributed industrial IoT: A multi-agent approach / W. Zhang, D. Yang, W. Wu [et al.]. DOI 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473515 // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021. № 39 (12). P. 3688-3703.
13. *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Vol. 31 : Natural Gas Liquids and Natural Gasoline to Offshore Process Piping: High Performance Alloys/ Nitrogen, Oxygen, and Argon Production 205. Oxford : Routledge, 2017. 512 p. ISBN 978-1351452335.
14. Analysis and Optimization of Cryogenic Distillation Systems: For Reducing Distillation Energy Consumption / S. Qiao, M. Xu, X. Lv, H. Zhao // *Chemical Engineering & Technology*. 2025. № 48 (1). P. e202400296.
15. Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit / S. Bucsa, A. Serban, M.C. Balan [et al.]. DOI 10.3390/E24020272 // *Entropy*. 2022. № 24 (2). P. 272.
16. Experimental study on the cryogenic distillation system for high-purity liquid nitrogen under offshore conditions / S. Wang, Y. Meng, L. Chen [et al.] // *Cryogenics*. 2024. № 141. P. 103885.
1. Mora C.A., Orjuela A. Modeling, validation and exergy evaluation of a thermally-integrated industrial cryogenic air separation plant in Colombia. Part II : Optimization under variable products demand. DOI 10.1016/j.cherd.2023.02.009 // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. № 191. P. 537-551.
2. Multi-scenario data-driven robust optimisation for industrial steam power systems under uncertainty / Y. Han, J. Zheng, X. Luo [et al.]. DOI 10.1016/j.energy.2022.126032 // *Energy*. 2023. № 263. P. 126032.
3. Multi-Scenario Crop Cultivation Optimization Strategies Based on Linear Programming and Dynamic Programming / G. Lin, M. Zhang, H. Ye, H. Wang. DOI 10.1145/3727993.372801 // *CMSDA '24: Proceedings of the 2024 4th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis-2024: CMSDA*. 2024. P. 120-128.
4. Fundamental knowledge and flexibility of thinking-priorities of management education for technological breakthrough / L.D. Gitelman, A.P. Isaev, M.V. Kozhevnikov, T.B. Gavrilova. DOI 10.17747/2618-947X-2022-2-92-107 // *Strategic decisions and risk management*. 2022. № 13 (2). P. 92-107.
5. The Use of an Optimized Grey Multi-Objective Programming-PLUS Model for Multi-Scenario Simulation of Land Use in the Weigan-Kuche River Oasis, China / K. Dong, Y. Wang, K. Luo [et al.]. DOI 10.3390/land13060802 // *Land*. 2024. № 13 (6). P. 802.
6. Braniff A., Tian Y. A hierarchical multi-parametric programming approach for dynamic risk-based model predictive quality control. DOI 10.1016/j.conengprac.2024.106062 // *Control Engineering Practice*. 2024. № 152. C. 106062.
7. Integrating stochastic programming and reliability in the optimal synthesis of chemical processes / Y. Chen, Y. Ye, Z. Yuan [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. 2022. № 157. P. 107616.
8. Liang Y. Learning from unknown information sources. DOI 10.1287/mnsc.2021.03551 // *Management Science*. 2025. № 71 (5). P. 3873-3890.
9. Gunantara N. A review of multi-objective op-

- timization: Methods and its applications. DOI 10.1080/23311916.2018.1502242 // Cogent Engineering. 2018. № 5 (1). P. 1502242.
10. Afsar B., Miettinen K., Ruiz F. Assessing the performance of interactive multi-objective optimization methods: A survey. DOI 10.1145/3448301 // ACM Computing Surveys (CSUR). 2021. № 54 (4). P. 1-27.
11. Priyadarshi R. Energy-Efficient Routing in Wireless Sensor Networks: A Meta-heuristic and Artificial Intelligence-based Approach: A Comprehensive Review. DOI 10.1007/s11831-023-10039-6 // Archives of Computational Methods in Engineering. 2024. № 34 (4).
12. Optimizing federated learning in distributed industrial IoT: A multi-agent approach / W. Zhang, D. Yang, W. Wu [et al.]. DOI 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473515 // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. № 39 (12). P. 3688-3703.
13. Encyclopedia of Chemical Processing and Design. Vol. 31 : Natural Gas Liquids and Natural Gasoline to Offshore Process Piping: High Performance Alloys/ Nitrogen, Oxygen, and Argon Production 205. Oxford : Routledge, 2017. 512 p. ISBN 978-1351452335.
14. Analysis and Optimization of Cryogenic Distillation Systems: For Reducing Distillation Energy Consumption / S. Qiao, M. Xu, X. Lv, H. Zhao // Chemical Engineering & Technology. 2025. № 48 (1). P. e202400296.
15. Exergetic analysis of a cryogenic air separation unit / S. Bucsa, A. Serban, M.C. Balan [et al.]. DOI 10.3390/E24020272 // Entropy. 2022. № 24 (2). P. 272.
16. Experimental study on the cryogenic distillation system for high-purity liquid nitrogen under offshore conditions / S. Wang, Y. Meng, L. Chen [et al.] // Cryogenics. 2024. № 141. P. 103885.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- И.Ю. Картель, А.Ю. Картель, В.Я. Губарев** Повышение эффективности установки частичного сжижения природного газа при использовании теплообменника-вымораживателя 3
- В.Н. Мещеряков, Л.Н. Языкова, Р.А. Сысоев, И.В. Музылева, Г.А. Терновских** Методика автоматического расчета параметров корректирующего устройства, подавляющего колебания в электроприводных системах с обеспечением заданных показателей качества переходных процессов 14
- О.А. Гаврина, Р.В. Ключев, Д.А. Ярцев, И.А. Гаврин** Анализ энергоэффективности и пути снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве металлургического предприятия 24
- К.С. Мочалин, Ю.М. Денчик, В.Г. Сальников, А.И. Антонов, Д.Ю. Руди, А.А. Руппель** Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи как факторы угрозы энергетической безопасности России 37
- С.С. Трошин** Методика определения аэродинамического момента регенеративного самовращающегося воздухоподогревателя 45
- Е.В. Гуриева, Г.Н. Хугаева** Современные насосные установки для горнодобывающих предприятий: энергоэффективность, автоматизация и контроль качества электроэнергии 53

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИКА

- Р.Ш. Узбеков, В.В. Челноков** Многосценарная оптимизация в условиях неопределенности для криогенных установок разделения воздуха 67

CONTENTS

ELECTRIC POWER INDUSTRY

- I.Yu. Kartel, A.Yu. Kartel, V.Ya. Gubarev** Increasing the efficiency of a partial liquefaction plant for natural gas using a heat exchanger-freezer 3
- V.N. Meshcheryakov, L.N. Yazykova, R.A. Sysoev, I.V. Muzyleva, G.A. Ternovskikh** A method for automatically calculating the parameters of a corrective device that suppresses vibration in electrical water systems, ensuring the specified quality indicators of transients..... 14
- O.A. Gavrina, R.V. Klyuev, D.A. Yartsev, I.A. Gavrin** Analysis of energy efficiency and ways to reduce electricity losses in the electrical industry of a metallurgical enterprise 24
- K.S. Mochalin, Y.M. Denchik, V.G. Salnikov, A.I. Antonov, D.Yu. Rudi, A.A. Ruppel** Conductive low-frequency electromagnetic interference as factors threatening Russia's energy security 37
- S.S. Troshin** Method for determining the aerodynamic moment of a regenerative self-rotating air heater 45
- E.V. Gurieva, G.N. Khugaeva** Modern pumping systems for mining enterprises: energy efficiency, automation and power quality control.....53

AUTOMATION AND INFORMATICS

- R.S. Uzbekov, V.V. Chelnokov** Multi-scenario optimization under conditions of uncertainty for cryogenic air separation plants.....67

Acting Chief Editor

Zatsepin Evgeny Petrovich – Cand.Sc. (Tech.), Associate Prof.

Executive Secretary

Shachnev Oleg Yaroslavovich – Cand.Sc. (Tech.), Associate Prof.

Members of the Editorial Council:

Saraev Pavel Viktorovich, D.Sc. (Tech.), Associate Prof. (Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk)

Pogodaev Anatoly Kiryanovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk)

Zatsepina Violetta Iosifovna, D.Sc. (Tech.), Prof. (Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk)

Byaly Vitold, D.Sc. (Tech.), Prof. (Silesian Technical University, Poland, Gliwice)

Voltchev Stanimir, D.Sc. (Tech.), Prof. (University of Lisbon, Portugal, Lisbon)

Ruomei Li, D.Sc. (Tech.), Prof. (Chinese Society of Electrical Engineering, China)

Krasnyansky Mikhail Nikolaevich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)

Lucas Vilmar Adolfovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Berlin Technical University, Germany, Berlin)

Naizabekov Abdrakhman Batyrbekovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Rudny Industrial Institute, Kazakhstan, Rudny)

Sukhinin Boris Vladimirovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Tula State University, Russia, Tula)

Timoshin Sergey Ivanovich, D.Sc. (Phys.-Mat.), Prof. (Gomel State Technical University, Belarus, Gomel)

Troyanovska Malgorzata, D.Sc. (Tech.), Prof. (Agrarian University, Poland, Krakow)

Morkun Vladimir Stanislavovich, D.Sc. (Tech.), Prof. (Krivoy Rog national university, Ukraine, Krivoy Rog)

Reza Derakhshani, D.Sc. (Philos.), (University of Utrecht, Netherlands, Utrecht)

Editorial board of the issue:

Electric power industry

Klyev R.V., D.Sc. (Tech.), Prof. (North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz)

Kachanov A.N., D.Sc. (Tech.), Prof. (Orel State University, Russia, Orel)

Shevyrev Yu.V., D.Sc. (Tech.), Prof. (National Research Technological University MISiS, Russia, Moscow)

Gracheva E.I., D.Sc. (Tech.), Prof. (Kazan State Power Engineering University, Russia, Kazan)

Automation and informatics

Chernyshova T.I., D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)

Kalinin V.F., D.Sc. (Tech.), Prof. (Tambov State Technical University, Russia, Tambov)

СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

В соответствии с Законом Российской Федерации об авторских правах сообщаю, что я, _____, автор (соавтор) статьи _____

уведомлен об ответственности за использование в статье таких материалов, защищенных авторским правом, как цитаты, воспроизведенные данные, иллюстрации и иные материалы, и о том, что ответственность за нарушение авторских прав ложится на автора статьи.

Я сообщаю, что данная статья не была опубликована и не представлена для публикации в другие периодические издания.

Число _____

Подпись _____

Корректоры:

М.Л. Дрепина
Н.Ф. Яковлева
О.В. Проскурина

Дата выхода в свет 30.12.2025. Подписано в печать 10.12.2025. Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,18. Уч.-изд. л. 9,27. Тираж 500 экз. Заказ № 222415

Свободная цена.

Регистрационный номер: серия ПИ № ФС77-82295 от 10 ноября 2021 г., зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции: 398055, Липецк, ул. Московская, д. 30, каб. 210.

Издатель: Липецкий государственный технический университет.

Адрес издателя: 398055, Липецк, ул. Московская, д. 30.

Телефоны: (4742) 32-80-48; 32-80-49. Факс: (4742) 32-80-48. E-mail: kaf-ee@stu.lipetsk.ru

Учредитель: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

Отпечатано в АО «Т8 - Издательские технологии».

109316, Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5.

Тел.: +7 (499) 322 38 30.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В журнале "Вести высших учебных заведений Черноземья" публикуются статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим рубрикам:

- Электроэнергетика;
- Автоматизация и информатика.

Статья должна поступить на электронные адреса kaf-eo@stu.lipetsk.ru и vestiVUZOV@yandex.ru (сразу на два адреса) и сохранена в версии Microsoft Word 2003 и выше. Рукопись статьи (2 экземпляра) и сопроводительные документы должны быть высланы в редакцию. К сопроводительным документам относятся:

- рецензия, отражающая следующие пункты: актуальность представленной работы; характеристика объекта исследования; качество постановки целей работы и задач исследования; степень научной новизны исследования, практическая значимость работы; учебно-методическая ценность исследования, стиль изложения; степень разработанности темы научного исследования; структурность работы. (В случае если один из авторов является доктором наук, то рецензия должна быть подписана доктором соответствующего профиля.)

- выписка из протокола заседания кафедры, на котором было принято решение о рекомендации публикации статьи в журнал "Вести высших учебных заведений Черноземья".

- согласие на публикацию и гарантии того, что статья не будет больше нигде опубликована, подписанные автором.

Оформление статьи должно соответствовать следующим требованиям:

1. На первой странице должны быть указаны: УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, название учреждения, представляющего рукопись для опубликования. Статья должна быть четко структурирована: введение; теория вопроса; подробное изложение методики проведения экспериментов, описание материалов и методов исследований, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение.

2. Текст статьи набирается в формате *.doc шрифтом TimesNewRoman размером 12 pt через одинарный интервал, без отступов, отступ красной строки 0,5 см, выравнивание по ширине, без уплотнения. Поля: верхнее, нижнее, левое, правое – 2 см. Не использовать табуляций, автоматических списков. Не использовать курсив, жирный текст и подчеркивания. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела.

3. Для набора формул применять редактор MathType 7. Формулы должны быть оформлены шрифтом TimesNewRoman, без курсива, размером 12 pt, одинарным интервалом; если обозначения в тексте выполнены в MathType, то они также изначально должны быть 12 pt. При верстке журнала формулы должны помещаться на половине страницы (8 см). Большие формулы необходимо разбивать на отдельные части. Фрагменты формул должны быть независимы (при использовании редактора формул каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

4. Рисунки должны быть сохранены в программе MicrosoftVisio и иметь возможность редактирования. Надписи – шрифтом TimesNewRoman, размером 12 pt, одинарным интервалом. Толщина линий: основных – 1 pt, вспомогательных – 0,5 pt. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG, GIF. Сканировать изображение следует с разрешением не менее 300 dpi. В случае если в тексте есть ссылка на рисунок, то пишется слово "рис.", переносы в названиях недопустимы.

5. Таблицы должны быть оформлены шрифтом TimesNewRoman, размером 12 pt, одинарным интервалом. В случае если в тексте есть ссылка на таблицу, то пишется слово "табл.". Подрисовочные подписи и названия таблиц должны быть на русском и английском языках.

6. Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи. Список составляется в соответствии с последовательностью ссылок в тексте. Библиографический список должен быть оформлен согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008 и иметь не менее 15 источников (из них не более 20 % – на собственные работы), с обязательным включением источников позднее 2015 г. и не менее 30 % ссылок на зарубежные работы (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР). Ссылки на библиографический список в тексте приводятся в квадратных скобках. Название источника публикации, а также технические сокращения (выпуск, том, страница и т.п.) должны быть переведены на английский язык с использованием общепринятых обозначений. При использовании электронных ресурсов необходимо ссылаться на первоисточник и указывать дату обращения.

7. Обозначения, термины и иллюстративный материал должны соответствовать действующим ГОСТ. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

8. К статье прилагаются: аннотация; ключевые слова (не менее 7 наименований); имена и фамилии авторов, ученые степени и звания, должности и почтовые адреса, места работы, электронные адреса; отдельным файлом на английском языке название статьи, аннотация, ключевые слова, имена и фамилии авторов, ученые степени и звания, должности и почтовые адреса, места работы, электронные адреса, библиографический список. Аннотация к статье должна достаточно полно раскрывать ее содержание и иметь объем до 500 печатных знаков (аннотация выполняется согласно ГОСТ 7.9-95). Аннотация должна быть переведена на английский язык.