

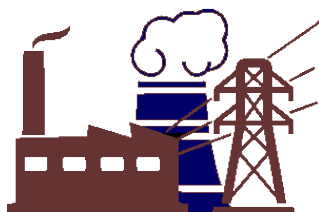
Энергетические Системы

Energy Systems

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

3
2023

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Научный журнал

2023 год, № 3



ENERGY SYSTEM

Scientific journal

2023, Vol. 3

ISSN 2782-3989

Сайт журнала: <http://j-es.ru/>

Тел.: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru

Год основания журнала – 2016.

Редакционная политика журнала базируется на основных положениях действующего российского законодательства в отношении авторского права и плагиата и принципах, изложенных в рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (COPE).

Все поступающие материалы проходят научное рецензирование (двойное слепое). Рецензирование статей осуществляется членами редакционной коллегии, ведущими учеными БГТУ им. В.Г. Шухова, а также приглашенными рецензентами.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции. Авторы статей сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы и вправе использовать свои произведения независимо от журнала.

Язык публикаций – русский, английский.

Рубрики ГРНТИ журнала:

- 440000. Энергетика;
- 450000. Электротехника;
- 670000. Строительство. Архитектура.

Рубрика OECD:

- 207. Environmental engineering.

Специальности ВАК:

- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
- 2.4.3. Электроэнергетика
- 2.4.4. Электротехнология и электрофизика
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность
- 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

В номере опубликована вторая часть материалов IX Международной научно-практической конференции «Энергетические системы – 2023В» (ICES-2023В), прошедшей 6-7 декабря 2023 г. в БГТУ им. В.Г. Шухова.

© БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023

Website: <http://j-es.ru/>

Telephone: +7 (910) 632-38-28

E-mail: Energobgtu@mail.ru

The journal was founded in 2016.

The editorial policy of the journal is based on the general provisions of the existing Russian legislation concerning copyright and plagiarism and the principles in the recommendations of the Committee on Publication Ethics (COPE).

All arriving materials undergo scientific reviewing (double blind). Reviewing of articles is carried out by the members of editorial board, the leading scientists of BSTU named after V.G. Shukhov and by invited reviewers.

All published materials are presented in the author's edition. The authors of the articles retain exclusive rights to the materials placed in the collection and have the right to use their works regardless of the journal.

The language of publications is Russian, English.

© Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov, 2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Трубаев Павел Алексеевич, председатель (главный редактор)

Д-р техн. наук, доц., профессор кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Белоусов Александр Владимирович

Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики, информационных технологий и управляющих систем, зав. каф. электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Бирюков Алексей Борисович

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. промышленной теплофизики ДонНТУ (г. Донецк)

Гашо Евгений Геннадиевич

Д-р техн. наук, доц., проф. кафедры Промышленных теплоэнергетических систем института проблем энергетической эффективности Национального исследовательского университета «МЭИ», эксперт аналитического центра при правительстве РФ (г. Москва)

Мозговой Николай Васильевич

Д-р техн. наук, проф., зав. каф. Промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ВГТУ (г. Воронеж)

Радченко Вадим Витальевич

Канд. экон. наук, Председатель Совета депутатов города Белгорода (г. Белгород)

Удовиченко Злата Викторовна

Канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской архитектурно-строительной академии (г. Макеевка Донецкой обл.).

Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi

PhD, Lecturer, University of Diyala (Baqubah, Diyala)

Marina Kozhukhova

PhD, COLLEGE OF Engineering & Applied Science, University of Wisconsin–Milwaukee (Milwaukee)

Корнилова Наталья Вячеславовна, научный секретарь

Ст. преп. кафедры электроэнергетики и автоматики БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)

Леонов Евгений Сергеевич, технический секретарь

Инженер кафедры энергетики теплотехнологии БГТУ им В.Г. Шухова (г. Белгород)



EDITORIAL BOARD

Pavel Trubaev, Chief editor

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor of the Department of Energy engineering of heat technology BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexandr Belousov

Cand. of Tech. Sciences (PhD), head of the Faculty of Energy, information technology and control systems BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Alexey Birukov

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial Thermal Physics Donetsk National Technical University (Donetsk)

Evgeniy Gasho

Dr. of Tech. Sciences (DSc), Professor of the Department of Industrial heat and energy systems Moscow Power Engineering Institute, Expert of Analytical Center Under the Government of the Russian Federation (Moscow)

Nikolay Mozgovoy

Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Head of the Department of Industrial ecology and Safety Voronezh State Technical University (Voronezh)

Vadim Radchenko

Cand. of Econom. Sciences (PhD), Vice-chairman of the Belgorod City Council, CEO of the Center of Energy Technologies Ltd (Belgorod)

Zlata Udovichenko

Cand. of tech. Sciences (PhDS), Associate Professor (Reader) of the Department of Heat and gas supply and ventilation Donbass Academy of Architecture and Construction (Makeyevka)

Marina Kozhukhova

PhD, Adjunct Professor University of Wisconsin-Milwaukee (Milwaukee)

Abdouloihabi Mohamed Valid Abdouloihabi

PhD, Lecturer, University of Diyala (Baqubah, Diyala)

Natalia Kornilova, Scientific secretary

Senior Lecturer of the Department of Power engineering and automatics BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)

Evgeny Leonov, Technical secretary

Engineer of the Department of Energy engineering of heat technology BSTU named after V. G. Shukhov (Belgorod)



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

Блинов В.Л., Жуков И.С.

Распознавание дефектов лопаточного аппарата турбомашин при помощи нейронной сети8

Никитин И.А., Петрунин Б.Н., Дмитриев С.С.

Экспериментальное исследование расходных характеристик ячеисто-лункового уплотнения для паровых турбин.....13

Сазонова С.А., Кораблин С.Н., Мозговой Н.В.

Дистанционное обнаружение утечек в теплоэнергетических трубопроводных системах24

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Жилин Е.В., Долгаль С.В., Малышева А.Д.

Перспективы применения накопителей электроэнергии в энергетических системах32

Прасол Д.А., Саенко А.А.

Концепция модернизации электрических подстанций в энергосистеме Белгородской области с применением цифровых технологий и решений42

Романов Л.Р., Погодина С.А., Крюков О.В.

Функциональные возможности систем релейной защиты и автоматики цифровых подстанций51

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Карнаух В.В., Байда Б.Ю. Приймак А.С.

О применении критериев TEWI, LCCP и LCC для сравнения энергопреобразующих холодильных систем58

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

Гаврилова А.А., Сагитова Л.А., Етряннов А.В.

Методика многокритериальной сравнительной оценки эффективности замены средств измерений и автоматики65



CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

Blinov Vitaly, Ivan Zhukov

Recognition of defects in the blade apparatus of turbomachines using a neural network8

Ivan Nikitin, Boris Petrunin, Sergey Dmitriev

Recognition of defects in the blade apparatus of turbomachines using a neural network8

Svetlana Sazonova, Sergey Korablin, Nikolai Mozgovoy

Remote leak detection in thermal power pipeline systems24

ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING

Evgenij Zhilin, Stanislav Dolgal, Alvina Malysheva

The perspectives of electric power storage devices using in energy systems32

Dmitriy Prasol, Andrey Saenko

The concept of modernizing electrical substations in the energy system of the Belgorod region using digital technologies and solutions42

Leonid Romanov, Svetlana Pogodina, Oleg Kryukov

Functional capabilities of relay protection and automation systems of digital substations51

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY

Viktoriia Karnaukh, Boris Bayda, Alexey Priymak

TEWI, LCCP and LCC metrics for comparing the refrigeration systems58

ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

Anna Gavrilova, Lyajsan Sagitova, Aleksandr Etrivanov

Methodology for multicriteria comparative assessment of the effectiveness of replacing measuring instruments and automation65



ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНИКА

HEAT AND POWER ENGINEERING



РАСПОЗНОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ТУРБОМАШИН ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Блинов В.Л., Жуков И.С.

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Аннотация

Правильная, исправная и качественная работа турбомашин напрямую зависит от состояния ее проточной части. Одной из причин снижения эффективности и надежности работы турбоагрегата выступает изнашивание лопаточного аппарата в связи с образованием различных дефектов на кромках и поверхности пера лопаток. В настоящем исследовании разрабатывается подход к автоматизации процесса дефектовки изделий с применением современных технологий компьютерного зрения (computer vision). В работе подготовлен программный код на языке программирования Python, создана база изображений дефектов лопаток, проведено обучение и тестирование модели YOLOv8. Достигнутая точность определения типа дефекта в проведенном исследовании превысила 80%.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, YOLOv8, модель, дефект, обнаружение, лопаточный аппарат, осевой компрессор, газотурбинный двигатель.

RECOGNITION OF DEFECTS IN THE BLADE APPARATUS OF TURBOMACHINES USING A NEURAL NETWORK

Blinov Vitaly, Ivan Zhukov

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg

Abstract

Correct, serviceable and high-quality operation of a turbomachine directly depends on the condition of its flow path. One of the reasons for the decrease in the efficiency and reliability of the turbine unit is the wear of the blade apparatus due to the formation of various defects on the edges and surface of the blade airfoil. This study develops an approach to automating the defect detection process of products using modern computer vision technologies. In this work, a program code was prepared in the Python programming language, a database of images of blade defects was created, and the YOLOv8 model was trained and tested. The achieved accuracy in determining the type of defect in the study exceeded 80%.

Keywords: convolutional neural networks, YOLOv8, model, defect, detection, blade apparatus, axial compressor, gas turbine engine.

Введение (Introduction)

Из-за попадания в проточную часть турбомашин посторонних частиц, мелкодисперсной пыли и других сред происходит деградация «механического» и, в частности, газодинамического состояния лопаточного аппарата (ЛА). Согласно [1], в эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), 60% всех отказов приходится на ЛА. Наибольшее влияние агрессивной среды испытывают лопатки осевых компрессоров (ОК), что подразумевает более тщательный осмотр и анализ их состояния. В процессе



дефектоскопии специалист подвержен различным факторам, способным снизить объективность и качество оценки состояния лопатки [2], что может привести к экономическим потерям [3].

Согласно статистике, анализ базы данных ScienceDirect [4], на которой собрано свыше 19 млн. научных публикаций, исследований и статей, показывает, что количество статей в области машиностроения с упоминанием термина «Computer vision» на 2023 год составляет 78452. Это говорит о том, что машинное зрение или машинное обучение находят применение в различных задачах промышленности. Например, авторами работы [5] была создана сеть, позволяющая с точностью 83% идентифицировать дефект лопатки ГТД, определить его размеры и положение.

Актуальность применения подобных решений применительно к турбомашинам заключается в возможности автоматизации процесса дефектоскопии, цифровизацией производства, а также развития методов предиктивной аналитики [6]. Данная работа направлена на разработку и создание методов классификации дефектов лопаточного аппарата турбомашин при помощи сверточных нейронных сетей в режиме реального времени, как на видео, так и на изображениях реальных лопаток компрессоров и турбин после эксплуатации.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Для решения задачи распознавания дефектов лопаточного аппарата используется сверточная нейронная сеть. Один из основных этапов при обучении моделей нейронной сети – сбор или создание базы данных (dataset), поскольку для достижения высокой точности результатов работы глубокие нейронные сети необходимо осуществлять обучать на огромном количестве тренировочных изображений. Для создания изображений необходим набор различных компрессорных и турбинных лопаток с дефектами. В рамках настоящего исследования создана база данных нескольких сотен изображений и разделена на обучающую, тестовую выборку и валидационную выборки. Обучающая выборка представлена тремя дефектами: надрез (nick), вмятина (dent) и обрыв пера (break_of_blade).

Разметка и аугментация изображений производится при помощи доступных библиотек и сервисов (LabelImg, Roboflow). Производится нанесение рамки вокруг дефекта и присваивается соответствующий тип (надрез, вмятина, обрыв пера).

В качестве обучаемой модели используется семейство сверточных нейронных сетей (НС) YOLO восьмой серии (YOLOv8). Разработка кода модели производится при помощи языка программирования Python (рис. 1) и подключаемых библиотек, таких как Keras, Tensorflow, OpenCV, Matplotlib и др.

Глубокое обучение проводится на облачном сервисе GoogleColab в связи большим потенциалом вычислительной техники и аппаратных ускорителей, способствующих многократному ускорению процесса обучения.

Подгрузка базы данных осуществляется с помощью сервиса Roboflow, обучение проводится в 50 эпох, что способствует более быстрому нахождению СНС закономерностей и увеличивает уверенность модели в идентификации дефекта на изображении (рис. 2, 3, 4).

```
%cd {HOME}

!yolo task=detect mode=train model=yolov8n.pt data={dataset.location}/data.yaml epochs=50 imgsz=800 plots=True
```

Рис. 1. Фрагмент программного кода для вызова и запуска обучения модели



```

!mkdir {HOME}/datasets
%cd {HOME}/datasets

!pip install roboflow --quiet

!pip install roboflow

from roboflow import Roboflow
rf = Roboflow(api_key="")
project = rf.workspace("machlearning").project("blade-defects-rbaqt")
dataset = project.version(1).download("yolov8")

```

Рис.2. Фрагмент программного кода для импорта и распаковки датасета

Validating runs/detect/train4/weights/best.pt...

Ultralytics YOLOv8.0.20 Python-3.10.12 torch-2.0.1+cu118 CUDA:0 (Tesla T4, 15102MiB)

Model summary (fused): 168 layers, 3006623 parameters, 0 gradients, 8.1 GFLOPs

Class	Images	Instances	Box(P)	R	mAP50	mAP50-95)
all	117	191	0.851	0.721	0.83	0.392
nadrez	117	17	0.807	0.882	0.896	0.401
obriv	117	48	0.927	0.799	0.883	0.509
skol	117	41	0.839	0.636	0.722	0.288
vmyatina	117	54	0.817	0.741	0.793	0.373
zaboina	117	31	0.865	0.548	0.855	0.39

Speed: 5.6ms pre-process, 4.0ms inference, 0.0ms loss, 4.0ms post-process per image

Results saved to runs/detect/train4

Рис. 3. Процесс обучения модели

В процессе обнаружения объектов на изображении видео разбивается на кадры, результатом работы НС является порог обнаружения определенного класса на изображении. Основная метрика качества для оценки качества модели – средняя точность модели (mAP_{0,5}), с ее помощью сравнивается ограничивающая рамка, предсказанная моделью, с рамкой, в которой находится дефект. Данная метрика используется для оценки точности работы моделей компьютерного зрения.

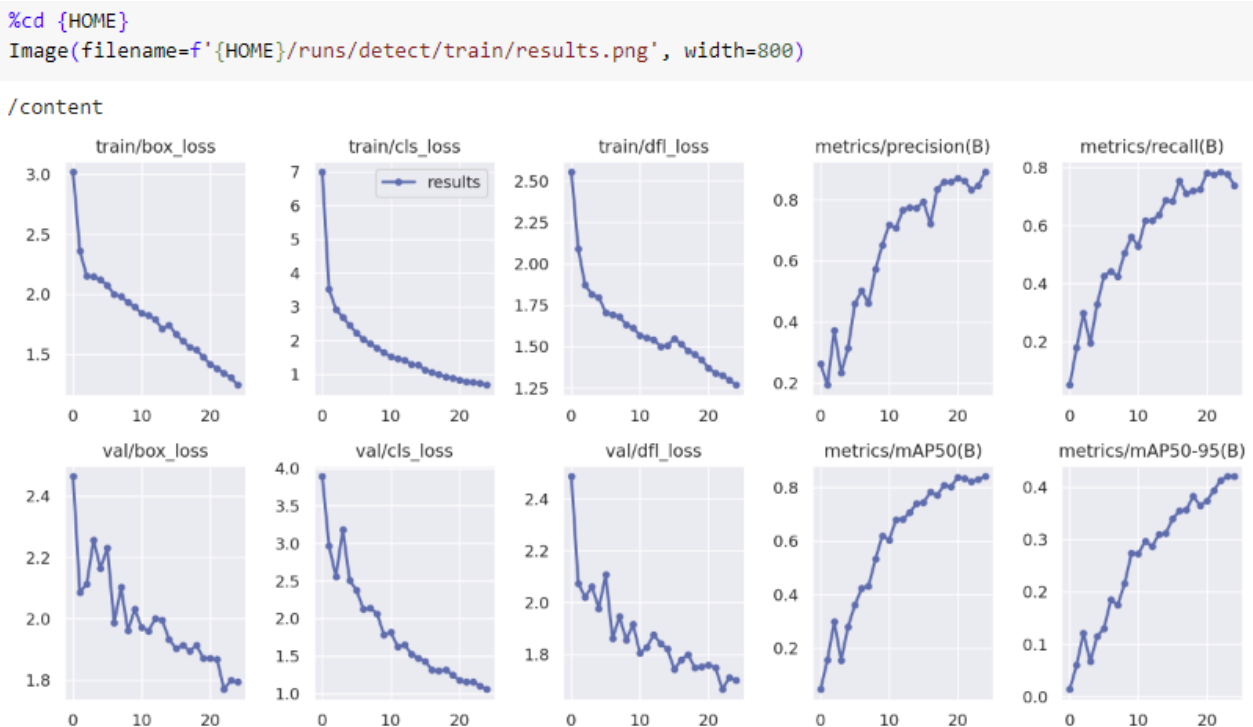


Рис. 4. Графическое представление процесса обучения



Результаты (Results)

Результатом работы НС является ограничивающая рамка вокруг дефекта и указания параметра mAP (уверенность НС) рядом с ней (рис. 5). В настоящем исследовании показатель средней точности превысил 80%.



Рис. 5. Вывод данных из валидационной выборки для модели YOLOv8x

Отклик НС YOLOv8x лежит в диапазоне до 2 секунд и зависит от вычислительной мощности компьютера, чем требовательнее модель, тем больше времени необходимо для обработки изображения или видеофайла.

Выводы (Conclusion)

Применение нейронных сетей является действенным инструментом, способным ускорить процесс дефектации лопаточного аппарата турбомашин. Уверенность НС напрямую зависит от количества эпох обучения, а также от технических характеристик вычислительной машины. Для повышения уверенности НС необходимо увеличивать объем базы данных, путём добавления нестандартных изображений (наличие нескольких дефектов, посторонние предметы на заднем плане, фоны, шумы и т.д.), что позволит НС видеть и определять гораздо больше закономерностей в обнаружении дефектов.

Библиографический список

1. Коваль С. И. Методы диагностики технического состояния газотурбинных двигателей в процессе эксплуатации и технического обслуживания // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2019. – Т. 8, № 2(46). – С. 53-58. EDN [CKPNZH](#)
2. See J.E. Visual inspection: a review of the literature [Электронный ресурс] Albuquerque (USA): Sandia National Laboratories, 2012. – 77 p. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc835891/> (Дата обращения: 22.11.2023).

October 1, 2012

3. Aust J., Pons D. Bowtie Methodology for Risk Analysis of Visual Borescope Inspection during Aircraft Engine Maintenance // *Aerospace*. – 2019. Vol. 6(10). – P. 110. DOI: [10.3390/aerospace6100110](https://doi.org/10.3390/aerospace6100110).
4. Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture / M. Javaid, A. Haleem, R.P. Singh et al. // *Sensors International*. – 2022. – Vol. 3(5). – P. 100132. DOI: [10.1016/j.sintl.2021.100132](https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100132).
5. Neuhauser F.M., Bachmann G., Hora P. Surface defect classification and detection on extruded aluminum profiles using convolutional neural networks // *International Journal of Material Forming*. – 2020. – Vol. 13. – P. 591-603. [Электронный ресурс]. DOI: [10.1007/s12289-019-01496-1](https://doi.org/10.1007/s12289-019-01496-1).
6. Цифровой подход к обнаружению дефектов лопаточного аппарата и оценке их влияния на характеристики турбомашин / В.Л. Блинов, О.В. Беляев, В.И. Брезгин, О.В. Комаров // *Турбины и Дизели*. – 2023. – № 3. – С. 38-44. EDN: [NSZKFZ](https://www.edn.ru/NSZKFZ)

Bibliography

1. Koval, S. I. (2019). Metody` diagnostiki texnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnny`x dvigatelej v processe e`kspluatatsii i texnicheskogo obsluzhivaniya [Methods for diagnosing the technical condition of gas turbine engines during operation and maintenance]. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy` nastoyashhego plyus*, 2(46), 53-58. [In Russian]
2. See, J. E. (October 1, 2012). *Visual inspection: a review of the literature*. Sandia National Laboratories. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc835891/>.
3. Aust, J., & Pons, D. (2019). Bowtie Methodology for Risk Analysis of Visual Borescope Inspection during Aircraft Engine Maintenance. *Aerospace*, 6(10), 110. <https://doi.org/10.3390/aerospace6100110>
4. Javaid, M., Haleem, A., Pratap, R. Singh, Rab, S., & Suman R. (2022). Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture. *Sensors International*, 3(5), 100132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100132>
5. Neuhauser, F. M., Bachmann, G., & Hora, P. (2019). Surface defect classification and detection on extruded aluminum profiles using convolutional neural networks. *International Journal of Material Forming*, 13, 591-603. <https://doi.org/10.1007/S12289-019-01496-1>
6. Blinov, V. L., Belyaev, O. V., Brezgin, V. I., & Komarov, O. V. (2023). Cifrovoj podxod k obnaruzheniyu defektov lopatochnogo apparata i ocenke ix vliyaniya na xarakteristiki turbomashin [Digital approach to detecting blade defects and assessing their impact on the characteristics of turbomachines]. *Turbiny` i Dizeli*, 3, 38-44. [In Russian]

Сведения об авторах

Блинов Виталий Леонидович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, v.l.blinov@urfu.ru. SPIN-код: [9294-0378](https://www.edn.ru/9294-0378)

Жуков Иван, аспирант, инженер кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Authors about

Vitalii Blinov, Cand. of Tech. Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, "Turbines and Engines" department, v.l.blinov@urfu.ru.

Ivan Zhukov, engineer, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, "Turbines and Engines" department.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯЧЕИСТО-ЛУНКОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Никитин И.А., Петрунин Б.Н., Дмитриев С.С.

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

Аннотация

В данной работе проведено исследование расходных характеристик уплотнения с ячеистым статором. Ротор имел лунковую поверхность с диаметром $d=10$ мм и глубиной $h=1$ мм. Статорная часть изготовлена из штампованных колец и радиальных пластин, образуя ячеистую структуру с прямоугольным сечением. На внешней пластине были выполнены отверстия для сепарации влаги в камеру уплотнения за статором. Серии экспериментов проводились с неподвижным диском и вращающимся при различных оборотах (1000; 2000; 3000 об/мин). Результаты построения расходных характеристик показали, что влияние вращения пренебрежимо мало. Численное исследование в Ansys выявило сложный пространственный характер течения газа в проточной части уплотнения с образованием обратных вихревых течений. В уплотнении с лунками вихри в ячейках напротив имеют более пологую структуру. Усиление вихревых структур связано с изменяющимся градиентом площади лунок, где происходит локальное ускорение основного потока, который, в свою очередь, нагнетает возмущенный поток в ячейки. Выполненные численный расчет и натурный эксперимент показали эффективность применения данной конструкции уплотнения для паровых турбин, особенно в узлах больших осевых перемещений валопровода относительно корпуса.

Ключевые слова: уплотнение, паровые турбины, расходная характеристика, зазор, статор, ротор.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW CHARACTERISTICS OF A CELLULAR WELL SEAL FOR STEAM TURBINES

Ivan Nikitin, Boris Petrunin, Sergey Dmitriev

National Research University of MPEI, Moscow

Abstract

In this paper, a study of the flow characteristics of a seal with a cellular stator is carried out. The rotor had a well surface with a diameter of $d = 10$ mm and a depth of $h = 1$ mm. The stator part is made of stamped rings and radial plates, forming a cellular structure with a rectangular cross section. Holes were made on the outer plate to separate moisture into the sealing chamber behind the stator. A series of experiments were carried out with a fixed disk and rotating at different speeds (1000; 2000; 3000 rpm). The results of the construction of consumption characteristics showed that the effect of rotation is negligible. Numerical research at Ansys revealed the complex spatial nature of the gas flow in the flow part of the seal with the formation of reverse vortex flows. In a seal with wells, the vortices in the cells, on the contrary, have a more gentle structure. The strengthening of vortex structures is associated with a changing gradient of the area of the wells, where local acceleration of the main flow occurs, which, in turn, pumps the perturbed flow into the cells. The numerical calculation and field experiment performed have shown the effectiveness of using this seal design for steam turbines, especially in nodes of large axial displacements of the shaft line relative to the housing.

Keywords: seal, steam turbines, flow characteristics, gap, stator, rotor.



Введение

В паровых турбинах из-за наличия вращающихся и неподвижных элементов присутствуют утечки рабочего тела в периферийных, диафрагменных, торцевых и концевых уплотнениях. В настоящее время одни из самых эффективных по расходу утечки являются ступенчатые лабиринтные уплотнения (с полным гашением кинетической энергии). Но данный вариант уплотнительной конструкции не всегда удается внедрить из-за большого осевого смещения ротора относительно статора. При этом для предотвращения осевого задевания применяют конструкцию прямоточного лабиринтного уплотнения, расходная характеристика которого хуже.

Однако качество применяемых уплотнений определяется не только утечкой, но и их сопротивлением износу. При эксплуатации паровых турбин, особенно в переходных режимах, в штатных уплотнениях неизбежны задевания ротора о статор и соответствующий износ гребней уплотнений, что, естественно, приводит к увеличению потерь от утечки [1]. В этой связи применяют так называемые ячеистые (сотовые) уплотнения, износ которых при эксплуатации позволяет безопасно и экономично их использовать. Тем не менее, возможно усилить уплотнительный эффект при помощи нелинейной поверхности, которая позволит уменьшить кинетическую энергию рабочего тела от ячейки к последующим ячейкам.

В настоящей работе была поставлена задача экспериментально оценить расход утечки через прямоугольно-ячеистое уплотнение с противоположной лунковой и гладкой поверхностью с целью оценить эффективность использования лунок и дать практические рекомендации по их применению.

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводился на установке, конструктивная схема которой представлена на рис. 1. В корпусе 1 расположен стандартный подшипниковый узел 2, вал которого 3 через пальцевую муфту 5 приводится во вращение электродвигателем 4 с частотным регулированием. Электродвигатель позволял при проведении эксперимента плавно изменять частоту вращения вала от 0 до 3000 мин⁻¹.

Воздух от компрессора ТВ-42-1,4 при максимальном избыточном давлении 40 кПа поступал в напорный трубопровод, в котором установлено расходомерное сопло, и через запорно-регулирующую задвижку подводится к стенду. Пройдя через кольцевую радиальную сопловую решетку 6, поток воздуха закручивался и попадал непосредственно в камеру перед рабочей частью, состоящую из роторного 7 и статорного 8 элементов исследуемого уплотнения, после которой по четырем патрубкам 9 выходил в атмосферу.

При работе экспериментальной установки на сжатом воздухе, содержащем капельную влагу, особенно важна была роль уплотняющих колец 10, минимизирующих попадание влаги в подшипниковый узел.

Форсунки 11, расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях, впрыскивают в проточную часть воду и позволяют исследовать сепарацию влаги. При этом происходило смешение капельной влаги и сжатого воздуха. Таким образом, закрученный воздушно-капельный поток поступал на вход в исследуемую модель уплотнения. После заполнения системы избыточная вода удалялась через дренаж 12.

В процессе эксперимента измеряли избыточное давление Δp_0 непосредственно перед уплотнением, статическое давление за уплотнением Δp_k с помощью водяного дифференциального манометра с точностью 2 мм вод. ст. Атмосферное барометрическое давление B измеряли с помощью ртутного барометра с погрешностью 1 мм рт. ст. После этого рассчитывали абсолютные давления перед уплотнением $p_0 = (B + \Delta p_0)$ и за уплотнением $p_k = (B + \Delta p_k)$ и отношение давлений $\varepsilon = p_k/p_0$.



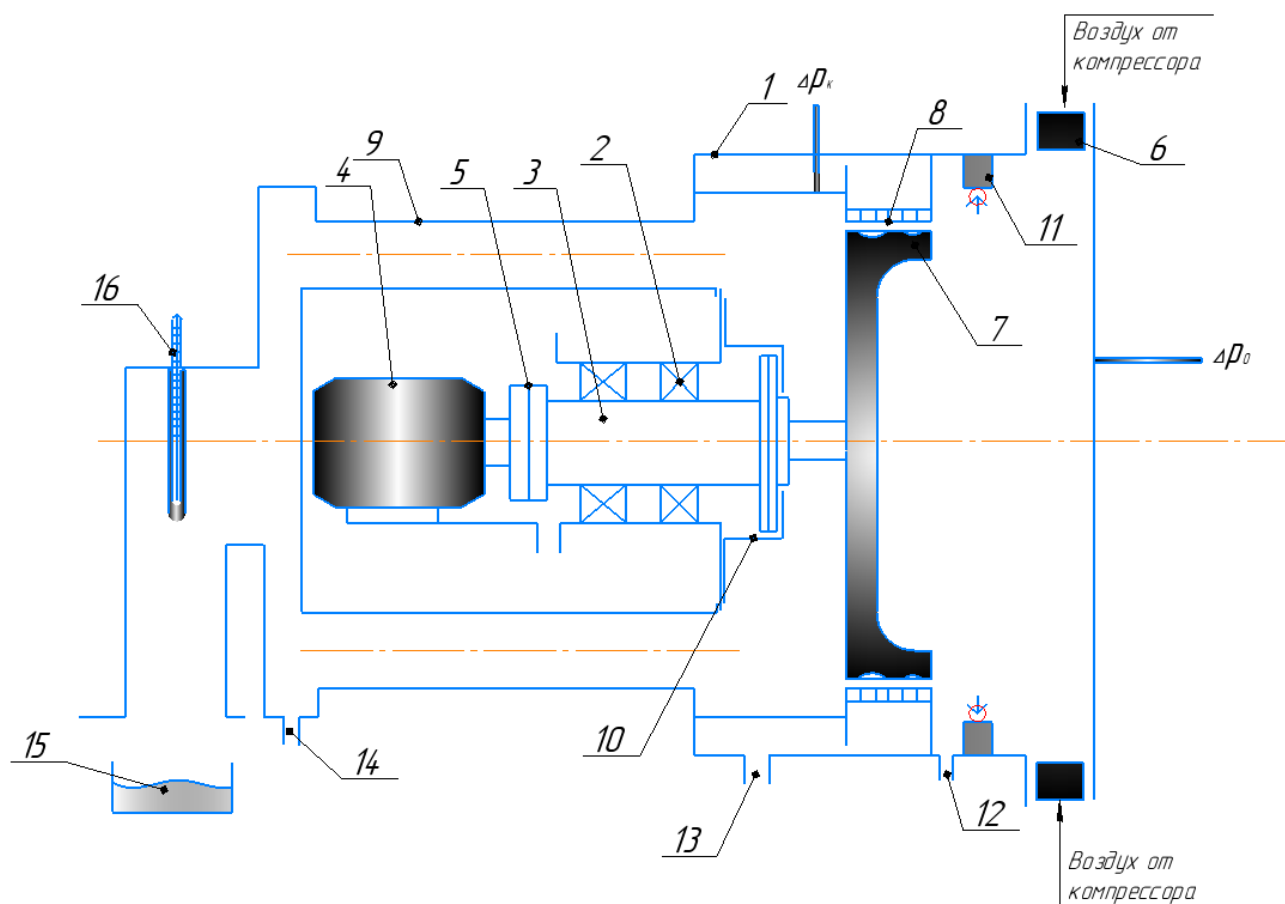


Рис. 1. Конструктивная схема стенда для исследования расходных характеристик и влажности прямоугольно-ячеистых уплотнений с лунковым и гладким ротором:

1 – корпус; 2 – стандартный подшипниковый узел; 3 – вал; 4 – электродвигатель; 5 – пальцевая муфта; 6 – сопловая решетка; 7 – ротор, 8 – прямоугольно-ячеистый статор; 9 – коллектор отвода воздуха; 10 – уплотняющее кольцо; 11 – форсунка; 12–14 – дренаж; 15 – водосборник; 16 – ртутный термометр.– таблица

Избыточное давление за расходомерным соплом Δp_{0c} измеряли с помощью зонда полного давления водяным дифференциальным манометром с погрешностью 2 мм вод. ст. Температуру полного торможения измеряли термометром **16** с погрешностью 1°C.

Отношение давлений ε перед уплотнением и на выходе из него вычисляли по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta p_k + B}{\Delta p_0 + B}.$$

Скорость одномерного потока на срезе сопла рассчитывали по формуле для одномерного потока идеальной несжимаемой жидкости, так как сжимаемостью потока можно было пренебречь [2]:

$$c = \sqrt{\frac{2\Delta p_0}{\rho}},$$

где ρ – плотность потока в выходном сечении сопла. Плотность рассчитывали по уравнению состояния:



$$\rho = \frac{B}{RT},$$

где R – универсальная газовая постоянная для воздуха; T – температура воздуха в струе в выходном сечении, определяемая по уравнению изоэнтропы по измеренной температуре полного торможения после сопла и перепадом давлений на него. Расход через сопло G вычисляли по формуле:

$$G = \rho c F_c,$$

где F_c – площадь выходного сечения сопла.

Описание конструкции уплотнения в рабочей части стенда и экспериментальные исследования расходных характеристик

Статорная часть (рис. 2) состояла из прямоугольно-ячеистой структуры, образованной стальными штампованными кольцами **1**, радиальными пластинами **2**, расположенными под углом 45° к плоскости по касательной. Внутренний диаметр статора таким образом составлял $d_{ст.} = 287,5$ мм. Также для сепарации влаги на внешней пластине выполнены сквозные отверстия **3**. В первом эксперименте ротор имел гладкую структуру рабочей поверхности (диаметр диска $d_{д.} = 285$ мм), во второй серии эксперимента на поверхности диска были выполнены 2 ряда лунковых выемок **4** по окружности, расположенные в шахматном порядке. Диск крепится к валу двигателя посредством шпилек, проходящих через отверстия **5**, и центруется относительно статора. Установочный зазор уплотнения после сборки составлял $\delta = 1,25$ мм. Важно отметить, что роторная часть была изготовлена из оргстекла на токарном станке, биение которого не превышало 0,05 мм.

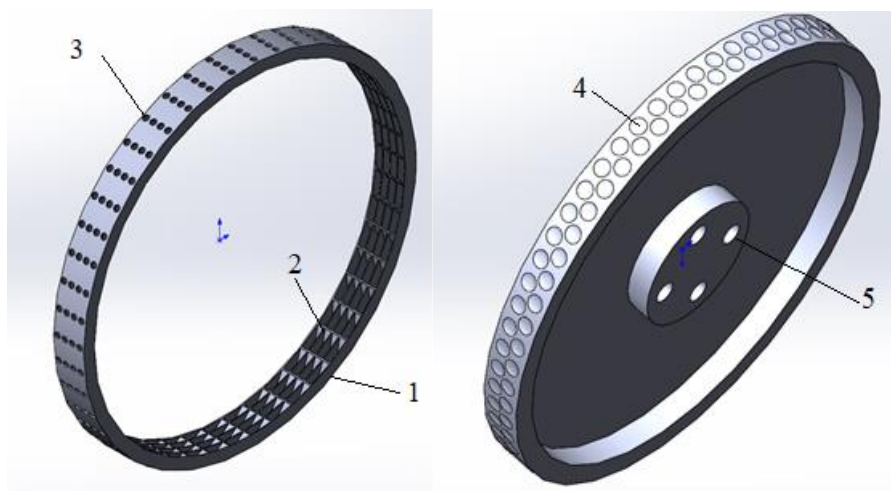


Рис. 2. Аксонометрия исследуемого уплотнения:

1 – кольца; 2 – пластины; 3 – отверстия для сепарации влаги; 4 – лунковые выемки; 5 – крепежные отверстия, передающие момент на вал

Серии экспериментов проводились с неподвижным диском и вращающимся при различных оборотах (1000; 2000; 3000 об/мин). Результаты построения расходных характеристик показали, что влияние вращения пренебрежительно мало (это подтверждают и другие авторы, например [4]), поэтому все дальнейшие результаты будут представлены для статического эксперимента.

При обработке экспериментальных данных были построены зависимости расхода утечки от перепада давлений на проточную часть уплотнения $G = f(\varepsilon)$ (рис. 3).

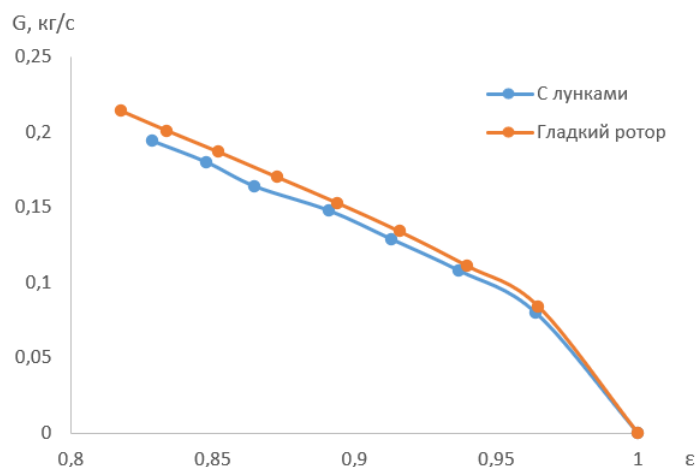


Рис. 3. Расходная характеристика прямоугольно-ячеистого уплотнения с лунковым и гладким ротором по результатам эксперимента

При $\varepsilon = 0,9$ расход утечки уплотнения с лунковым ротором уменьшился на 5,7% по сравнению с гладким, а для перепада давлений $\varepsilon = 0,85$ экономичность составила уже 6%.

Перепад давлений на периферии первой рабочей ступени ЦНД турбины типа К-800-23,5 составляет $\varepsilon = 0,82$ и далее идет на уменьшение до $\varepsilon = 0,5$ в последней ступени. Компрессор ТВ-42-1,4 при максимальном избыточном давлении 40 кПа, который задавал параметры рабочего тела на входе в исследуемое уплотнение, не дал перепад ниже $\varepsilon = 0,82$. Более того, при дальнейшем снижении ε течение преобразуется в сверхзвуковое с образованием обратных вихревых течений, что усложняет измерение относительного давления в характерных точках, и дальнейший расчёт нужно производить с учётом сжимаемости среды (число Маха $M > 0,3$). В связи с этим представляется интерес расширения диапазона исследования расходной характеристики с использованием численных методов, рассмотренных ниже.

Результаты исследования сепарации влаги

Удаление влаги из проточной части турбины существенно снижает эрозионный износ лопаток и наряду с этим способствует уменьшению потерь энергии от влажности, т.е. повышению относительного внутреннего КПД ступеней. Как показывают опыты, удается удалить только крупнодисперсную влагу, которая составляет небольшую долю общего влагосодержания пара [3].

Одним из способов удаления влаги из проточной части является периферийная сепарация. Влага за счет инерционных сил отбрасывается к периферии ступени, поступает в камеру отбора через прямоугольно-ячеистое уплотнение [5] и затем удаляется из проточной части турбины. Отвод влаги в область пониженного давления сопровождается отсосом некоторого количества рабочего тела, что приводит к снижению КПД ступени.

Следует отметить, что окружная скорость крупнодисперсной влаги в рабочих лопатках выше, чем в сопловой решетке. Поэтому эффективность влагоудаления через периферийное уплотнение может существенно снизить эрозионный износ лопаток.



После получения расходной характеристики (рис. 3) с целью определения эффективности сепарации уплотнения (рис. 2) был проведён эксперимент с влажногазовым потоком для гладкого диска и с лунковой поверхностью.

Эксперимент начинали с подачи на стенд воздуха и установления необходимых параметров аэродинамического режима: давления перед уплотнением и после него, расхода воздуха и его температуры. После этого через форсунки **11** (рис. 1) начинала поступать вода на вход в исследуемую модель уплотнения. С этого момента производили отсчет времени проведения опыта.

При проведении эксперимента измеряли массу (расход) воды, отсепарированной в уплотнении и вытекшей через дренаж **13** (G_2), а также унесенной потоком воздуха после уплотнения и поступившей в дренаж **14** (G_3) и водосборник **15** (G_4). После прекращения подачи воды в форсунки **11** открывали дренаж **12** и измеряли массу воды, вытекшей из него (G_1). Таким образом определялся суммарный расход воды $G_{\text{сум}}$, подаваемый в пространство перед уплотнением:

$$G_{\text{сум}} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4.$$

Для уменьшения погрешности измерений из-за неизбежных утечек в системе водоподготовки для каждого исследованного режима проводили 5 замеров отсепарированной через уплотнение влаги G_2 и суммарного расхода $G_{\text{сум}}$ и осредняли полученные значения.

Практический интерес для исследования сепарационной способности уплотнения представляет коэффициент сепарации ψ , %, который вычисляли по формуле:

$$\psi = \frac{G_2}{G_{\text{сум}} - G_1} \times 100.$$

Для каждого значения ϵ по полученным результатам на рис. 4 построена зависимость коэффициента сепарации от перепада давлений $\psi = f(\epsilon)$.

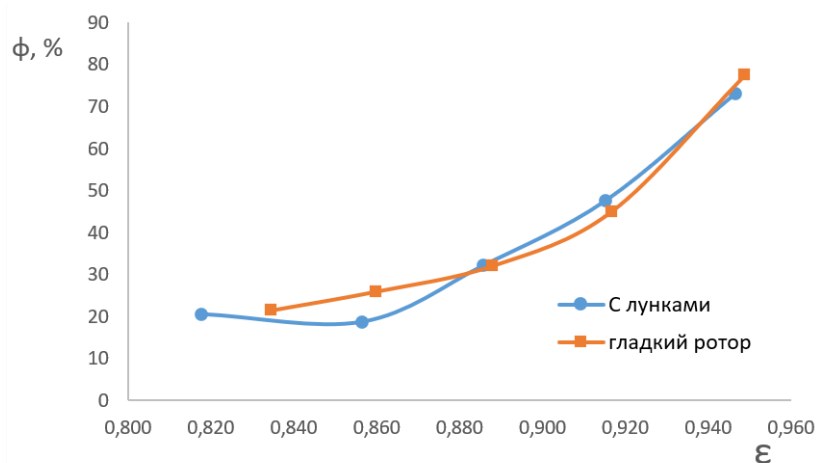


Рис. 4. Характеристика коэффициента сепарации от перепада давлений

Как видно, количество влаги, отсепарированной через уплотнение, увеличивается с уменьшением перепада давлений на него. При этом в пределах погрешности сепарационная способность двух вариантов исполнения ротора одинаковая. Влияние вращения также не было зарегистрировано для гладкого и лункового диска, поэтому представленная характеристика построена при $n = 0$ Гц.



Особенности и результаты расчета методом численного моделирования

Моделирование уплотнения было проведено в CAD (Computer-aided design) программе SolidWorks с последующим анализом CFD (Computational Fluid Dynamics) в CAE (Computer-aided engineering) пакете Ansys Fluent. Численное исследование проводилось путём решения системы уравнений Навье – Стокса для отдельной ячейки сетки.

На рис. 5 показана расчетная сетка прямоугольно-ячеистого уплотнения с прямыми радиальными пластинами для варианта с лунковым ротором. Для увеличения производительности вычислительных мощностей и построения качественной сетки был рассмотрен сегмент уплотнения с применением функции **periodic** (с допущением, что физические процессы по окружности одинаковые).

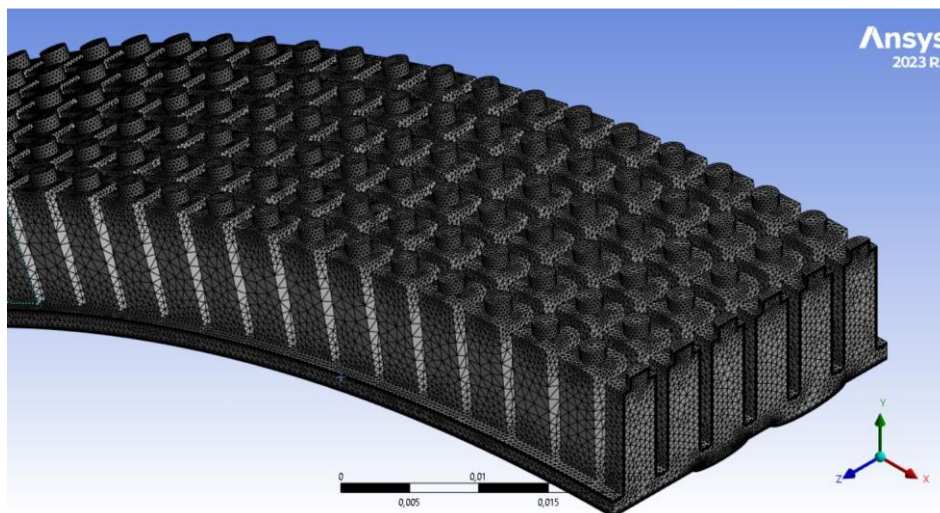


Рис. 5. Расчетная сетка исследуемого уплотнения

Т.к. между моделью статора и ротора зазор $\delta = 1,25$ мм, большое влияние на течение будут иметь пограничные слои. В связи с этим турбулентная вязкость описывается с помощью дифференциальной модели $q-\omega$. В структурированной, автоматически построенной комбинированной $O-H$ -сетке в двух вариантах содержится $8 \div 10 \times 10^6$ ячеек (здесь O -сетка – часть $O-H$ -сетки, образующая узкий слой ячеек вокруг профиля, которая затем переходит в H -сетку между соседними профилями – сетку с более крупными ячейками).. Применение $O-H$ -сетки позволяет повысить точность вычислений вблизи поверхностей уплотнительного канала. Это достигается применением экспоненциального закона уменьшения размера ячеек по мере приближения к поверхности примерно в пределах пограничного слоя. При таком подходе в первой ячейке на стенке во всех случаях $y^+ < 1$ (здесь y^+ – параметр, характеризующий качество сетки пограничного слоя). Это указывает на высокую точность расчетного подхода, реализованного на основе топологии используемой расчетной сетки [6].

В процессе исследований был выявлен сложный пространственный характер течения газа в проточной части уплотнения с образованием обратных вихревых течений [7]. На рис. 6 представлена эпюра скоростей для лункового (а) и гладкого (б) роторов для перепада давлений $\varepsilon = 0,8$. Отчетливо видно, что в уплотнении с лунками вихри в ячейках напротив имеют более пологую структуру. Усиление вихревых структур связано изменяющимся градиентом площади лунок, где происходит локальное ускорение основного потока, который, в свою очередь, нагнетает возмущенный поток в ячейки. Причем это возмущение сильнее в местах отрыва потока в лунках: между первым и вторым углублением. На эпюрах давлений (рис. 7) явно видно падение статического давления в месте отрыва потока.



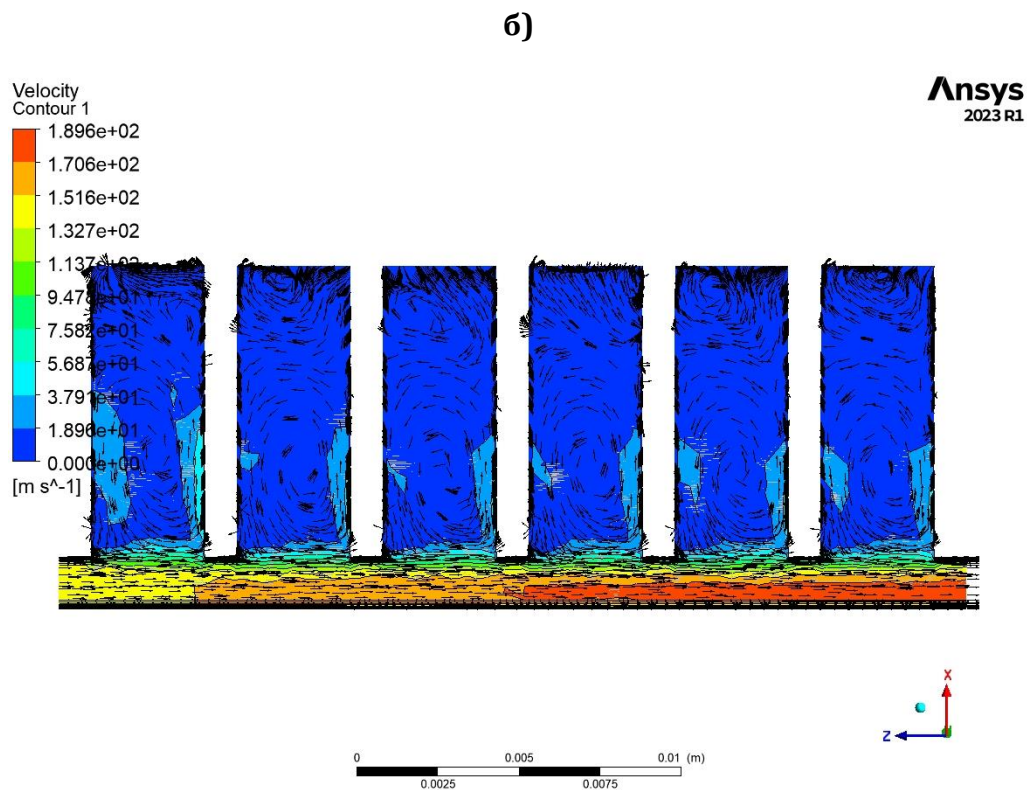
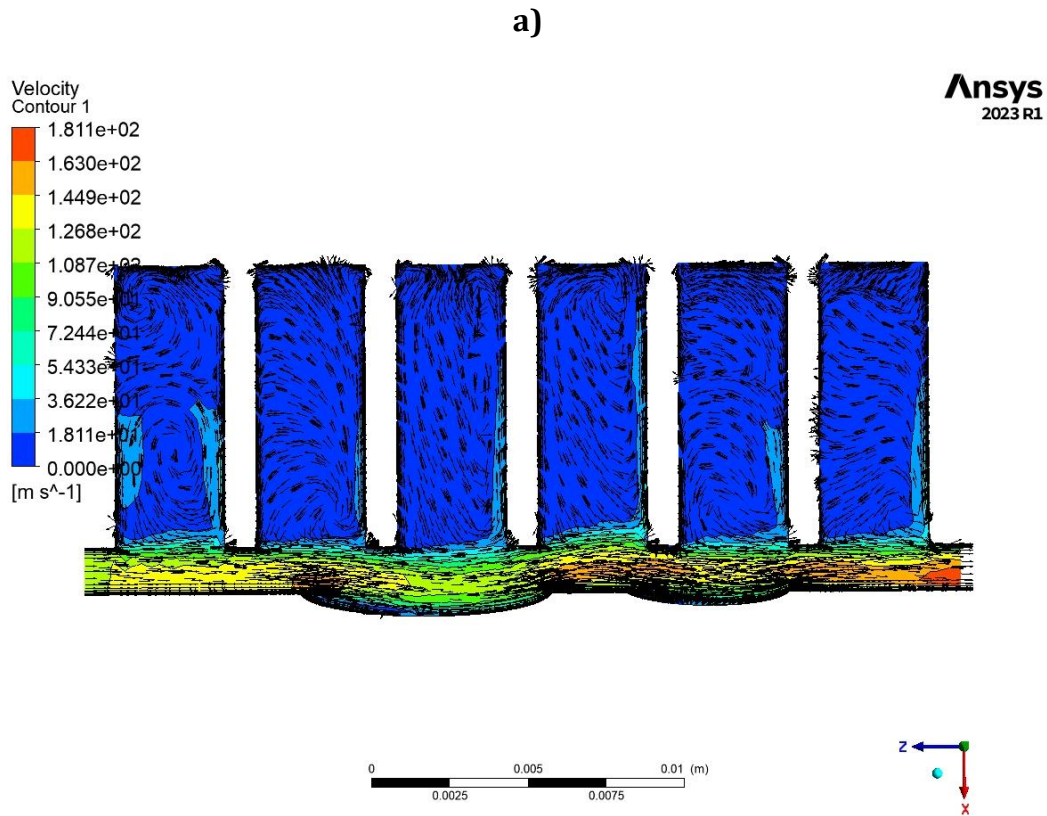


Рис. 6. Распределение проекции абсолютной скорости в продольном сечении уплотнения

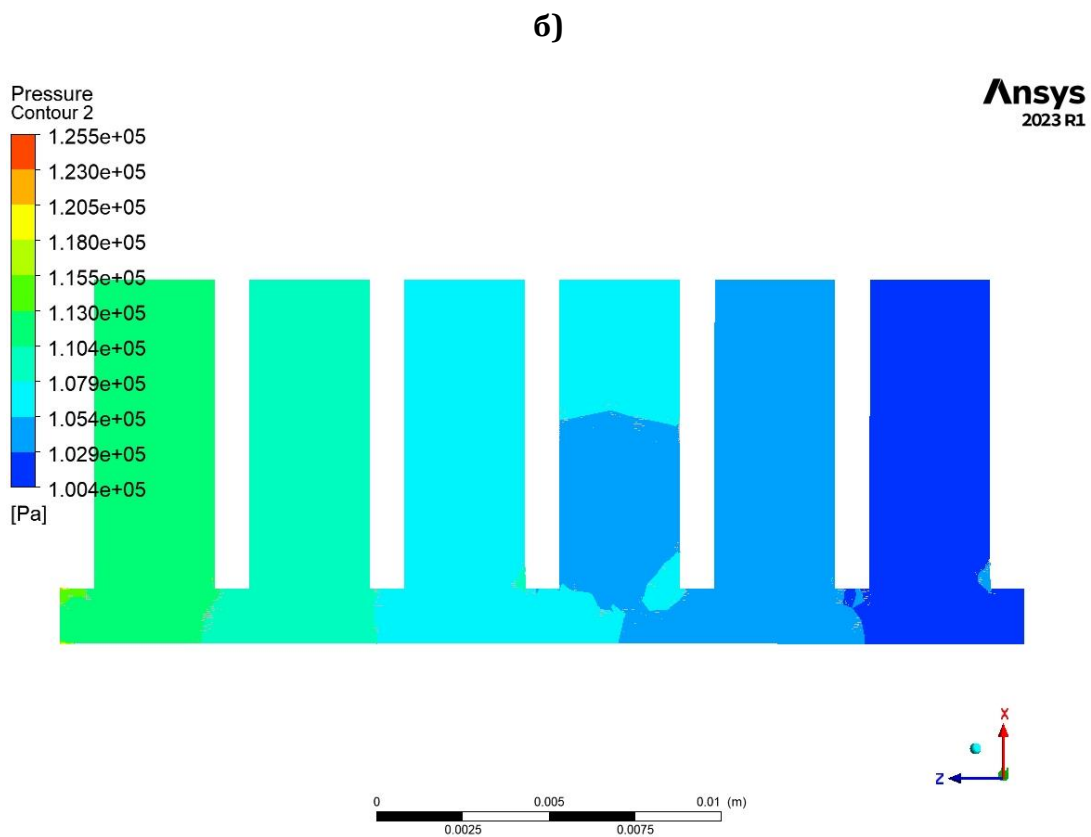
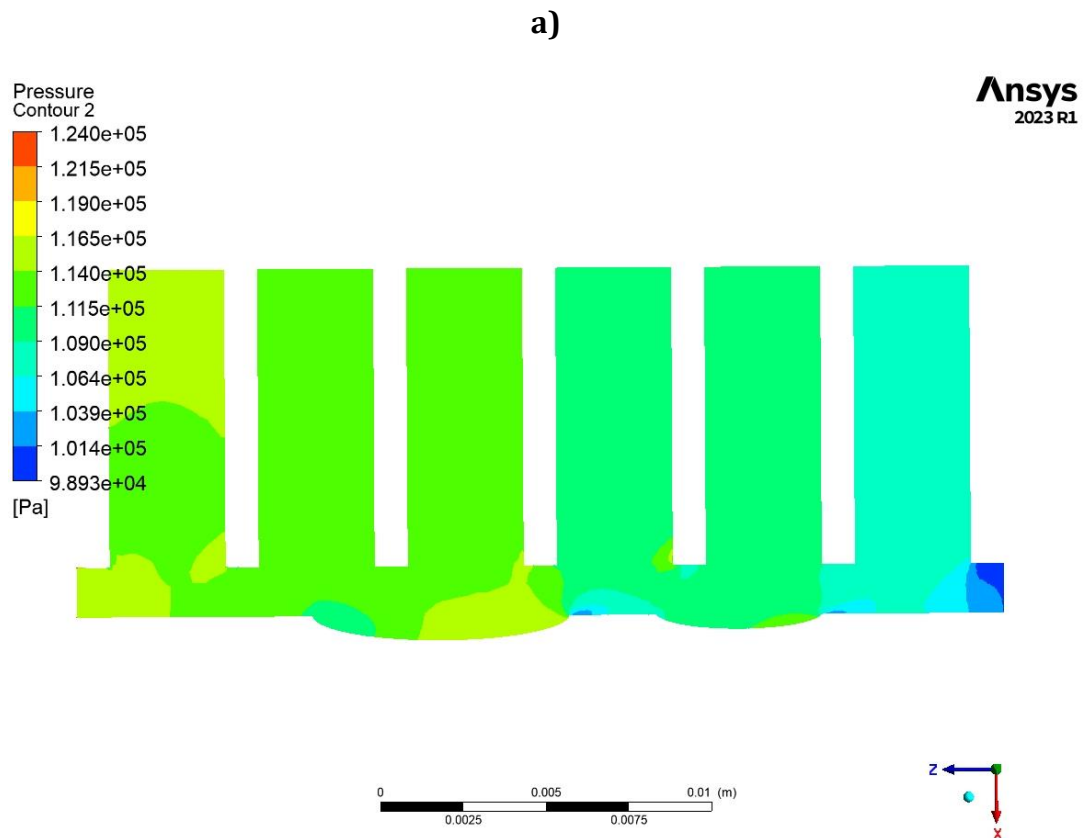


Рис. 7. Распределение статического давления в продольном сечении уплотнения

Для исследованного уплотнения по полученным данным численного моделирования была построена расходная характеристика $G = f(\varepsilon)$ (рис. 8). При $\varepsilon = 0,75$ расход утечки уплотнения с лунковым ротором уменьшился на 8% по сравнению с гладким.

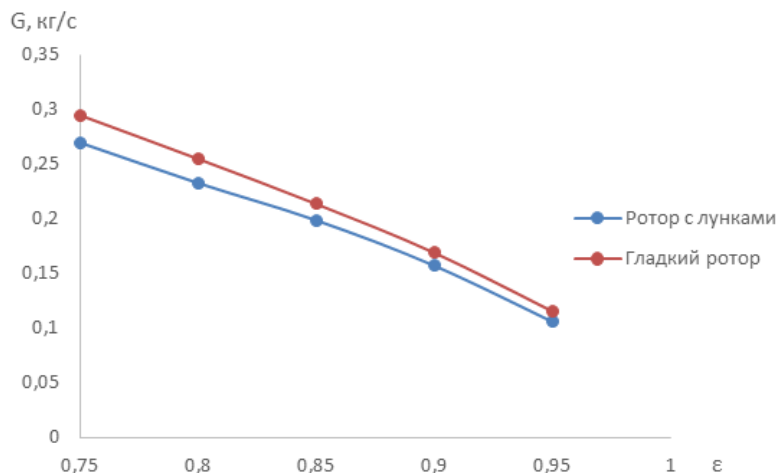


Рис. 8. Расходная характеристика прямоугольно-ячеистого уплотнения с лунковым и гладким ротором по результатам численного моделирования

Сравнение результатов расчетов с данными экспериментов, полученных при исследовании модели уплотнения, показало увеличение расхода утечки уплотнения с прямоугольно-ячеистым статором, образованным прямыми радиальными пластинами (численное моделирование), по сравнению с прямоугольно-ячеистым статором, где радиальные пластины, формирующие ячейки, наклонены под углом 45° к плоскости по касательной (эксперимент). Это объясняется влиянием закрутки потока и направлением радиальных пластин, которые позволяют улавливать перетекающие линии тока поперек уплотняющего канала.

Выводы

1. Предложенная конструкция уплотнения показывает отличную эффективность по уменьшению расхода утечки при том же радиальном зазоре по сравнению с прямоугольно-ячеистым уплотнением с гладким ротором.
2. Результаты исследования прямоугольно-ячеистого уплотнения с комбинированным использованием лунок на противоположной роторной части показали возможность применения его в качестве эффективного конструкторского решения для уменьшения расхода утечки в узлах больших осевых перемещений валопровода относительно корпуса.

Библиографический список

1. Дмитриев С.С., Петрунин Б.Н., Ахмед М.Э.А.Э. Экспериментальные исследования расходных характеристик разношаговых многогребенчатых уплотнений // Теплоэнергетика. – 2021. – № 4. – С. 47-54. EDN: [BHZYDQ](#). DOI: [10.1134/S0040363621030024](#)
2. Зарянкин А.Е. Механика несжимаемых и сжимаемых жидкостей. – М.: Изд. дом МЭИ, 2022. – 590 с. Костюк А.Г., Фролов В.В., Булкин А.Е., Трухний А.Д.
3. Паровые и газовые турбины для электростанций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д.Трухний; под ред. А.Г. Костюка. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 557 с.



4. Дмитриев С.С., Петрунин Б.Н., Ахмед М.Э.А.Э. Экспериментальные исследования влияния вращения ротора и закрутки потока перед уплотнениями на расход утечки // Теплоэнергетика. – 2021. – № 2. – С. 16-27. EDN: [ZTLRIO](#). DOI: [10.1134/S0040363621010124](#).
5. Исследование сепарационной способности нового периферийного уплотнения НИУ МЭИ / В.Г. Грибин, С.С. Дмитриев, Б.Н. Петрунин, М.Э.А.Э. Ахмед // Теплоэнергетика. – 2020. - №6. – С. 21-27. EDN: [EYSVEW](#). DOI: [10.1134/S004036362006003X](#)
6. Афанасьев И.В., Грановский А.В., Манаев И.А. Исследование влияния конструкции корпуса на потери в безбандажных турбинных лопатках // Теплоэнергетика. – 2022. – № 8. – С. 21-30. EDN: [MXDABS](#). DOI: [10.56304/S0040363622070013](#)
7. Результаты исследования регулирующего клапана с обратным подводом пара / В.Г. Грибин, О.М. Митрохова, А.В. Шерстнева, П.М. Нестеров // Теплоэнергетика. – 2023. – № 6. – С. 56-66. EDN [HADTIN](#). DOI: [10.56304/S004036362306005X](#)

References

1. Dmitriev, S. S., Petrunin, B. N., & Mohamed, E. A. E. A. (2021). Experimental studies of the discharge characteristics of variable-pitch multifinned seals. *Thermal Engineering*, 68(4), 295-301. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030022>
2. Zaryankin, A. E. (2022). *Mexanika neszhimaemy'x i szhimaemy'x zhidkostej* [Mechanics of incompressible and compressible fluids]. Izd. dom MEI. [In Russian]
3. Kostyuk, A. G., Frolov, V. V., Bulkin, A. E., & Truxnij, A.D. (2016) *Parovy'e i gazovy'e turbiny' dlya e'lektrostancij* [Steam and gas turbines for power plants] (Ed. A.G. Kostyuk). Izd. dom MEI. [In Russian]
4. Dmitriev, S. S., Petrunin, B. N., & Mohamed, E. A. E. A. (2021). Experimental studies into the effect that the rotor rotation and flow swirling upstream of seals have on the leakage flowrate. *Thermal Engineering*, 68(2), 94-104. <https://doi.org/10.1134/S0040601521010122>
5. Gribin, V. G., Dmitriev, S. S., Petrunin, B. N., & Ahmed Mohamed, E.A.E. Study into the separation ability of the new nru mpei peripheral sealing. *Thermal Engineering*, 67(6), 343-348. <https://doi.org/10.1134/S0040601520060038>
6. Afanasyev, I. V., Granovsky, A. V., & Manaev I. A. (2022). Studying the casing design influence on the losses in unshrouded turbine blades. *Thermal Engineering*, 69, 569-577. <https://doi.org/10.1134/S0040601522070011>
7. Gribin, V. G., Mitrokhova, O. M., Sherstneva, A. V., & Nesterov, P. M. (2023). Results from the study of a control valve with reverse steam supply. *Thermal Engineering*, 70, 443-452. <https://doi.org/10.1134/S0040601523060058>

Сведения об авторах

Никитин Иван Алексеевич, ведущий инженер кафедры паровых и газовых турбин, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, e-mail: nikitinia@mpei.ru.

Петрунин Борис Николаевич, канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер кафедры паровых и газовых турбин, НИУ МЭИ.

Дмитриев Сергей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин, НИУ МЭИ.

Authors about

Ivan Nikitin, Leading Engineer of the Department of Steam and Gas Turbines, NRU MPEI. e-mail: nikitinia@mpei.ru.

Boris Petrunin, Ph.D., Associate Professor, Leading Engineer of the Department of Steam and Gas Turbines, NRU MPEI.

Sergey Dmitriev, Ph.D., Associate Professor of the Department of Steam and Gas Turbines, NRU MPEI.



ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ УТЕЧЕК В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Сазонова С.А., Кораблин С.Н., Мозговой Н.В.

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

Аннотация

Рассматриваются особенности разработки методов технической диагностики для дистанционного контроля параметров работы теплоэнергетических трубопроводных систем, с основным акцентом на системах теплоснабжения, включая обнаружение утечек, а также в создании программного обеспечения для автоматизированных систем управления. Предложены математические модели для дистанционного обнаружения утечек, реализуемые с помощью программного обеспечения для осуществления регулярного мониторинга и обслуживания, чтобы обеспечить надежную работу рассматриваемых систем. Показано, что создание алгоритмов и системы требуется для обнаружения утечек, включая определение их местоположение и масштаб. Созданное программное обеспечение можно использовать для автоматизированного управления и мониторинга теплоэнергетической системы на основе результатов исследования. На основе собранных данных, связанных с параметрами системы теплоснабжения, таких как давление, расход газа и других, можно построить статистическую модель, которая может включать в себя распределение вероятности, ожидаемые значения и дисперсии параметров. Решение задачи конкретного обнаружения утечек может различаться в зависимости от типа теплоснабжения и используемых технологий. Показано, что исследование будет способствовать повышению надежности и безопасности систем теплоснабжения путем обеспечения более эффективного обнаружения и контроля утечек и других аномалий в работе трубопроводных систем.

Ключевые слова: теплоэнергетические гидравлические системы, системы теплоснабжения, утечки, математическая модель, мониторинг технического состояния системы, программная обработка информации.

REMOTE LEAK DETECTION IN THERMAL POWER PIPELINE SYSTEMS

Svetlana Sazonova, Sergey Korablin, Nikolai Mozgovoy

Voronezh State Technical University, Voronezh

Abstract

The features of the development of technical diagnostic methods for remote control of the parameters of the operation of thermal power pipeline systems are considered, with a main focus on heat supply systems, including leak detection, as well as in the creation of software for automated control systems. Mathematical models for remote leak detection are proposed, implemented using software for regular monitoring and maintenance to ensure reliable operation of the systems under consideration. It is shown that the creation of algorithms and a system is required to detect leaks, including determining their location and scale. The created software can be used for automated control and monitoring of a thermal power system based on the results of the study. Based on the collected data related to the parameters of the heat supply system, such as pressure, gas flow and others, it is possible to build a statistical model that may include the probability distribution, expected values and variances of the parameters. The solution to the problem of specific leak detection may vary depending on the type of heat supply and the technologies used. It is shown that the study will contribute to improving the reliability and safety of heat supply systems by providing



more effective detection and control of leaks and other anomalies in the operation of pipeline systems.

Keywords: thermal power hydraulic systems, heat supply systems, leaks, mathematical model, monitoring of the technical condition of the system, program information processing.

Введение

Основная цель исследований заключается в разработке методов технической диагностики теплоэнергетических трубопроводных гидравлических систем, обеспечивающих дистанционный контроль параметров режима работы таких систем, в первую очередь систем теплоснабжения, с учетом утечек и их реализации в виде программного обеспечения для автоматизированных систем управления [1].

Применительно к гидравлическим системам предлагается использовать математический приемник информации, реализующий метод диагностики утечек на основе манометрической съемки.

Материалы и методы

Заключение о наличии утечки принимается не по одному значению x_n , а по выборке X_n , которую формально можно представить как

$$X_n = \lambda \alpha S_n + \Xi_n \quad (1)$$

где n – длина выборки; λ – параметр, описывающий неопределенность; α – амплитуда утечки; S_n – множество возможных значений утечки с элементами S_i ; Ξ_n – значения с элементами ξ_i некоррелированных помех.

Процедура проверки гипотезы в рамках метода максимального правдоподобия заключается в определении отношения правдоподобия в виде

$$L(X_n | \alpha^*, \sigma_1^{2*}, \sigma_2^{2*}) = \left[\frac{\sigma_2^{2*}}{\sigma_1^{2*}(\alpha^*)} \right]^{n/2} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{E} \left(\sum_{i=1}^n x_i s_i \right)^2} \right\}^{n/2}. \quad (2)$$

где символом "*" помечены оцениваемые параметры окружения; $E = \sum_{i=1}^n s_i^2$.

Отношение $\sigma_2^{2*} / \sigma_1^{2*}(\alpha^*)$ должно сравниваться с порогом $C(X_n)$, при условии $\sigma_2^{2*} / \sigma_1^{2*}(\alpha^*) \geq C(X_n)$ принимается решение о наличии утечки. Обратное соотношение свидетельствует о ее отсутствии.

Порог $C(X_n)$ определяется как

$$C(X_n) = \left(\frac{g_{21} - g_{22}}{g_{12} - g_{11}} \frac{p_2}{p_1} \frac{\Delta \alpha}{\sqrt{\pi}} \sqrt{h_0^*} \right)^{\frac{2}{n-2}}, \quad (3)$$

где: $h_0^* = E / 2\sigma_1^{2*}(\alpha^*)$ – оценочное значение отношения сигнал / шум.

Величину функции потерь g_{ij} в (3) можно считать независимой от значения сигнала. Вероятности ситуаций p_1, p_2 в (3) определяются:



$$p(h^* | 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } h^* < 0, \\ \frac{1}{\sqrt{\pi h^*}} \exp(-h^*) & \text{при } h^* \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

и при $\lambda=1$

$$p(h^* | 1) = \begin{cases} 0 & \text{при } h^* < 0, \\ \frac{1}{2\sqrt{\pi h^*}} \left\{ \exp \left[-\left(\sqrt{h^*} - \sqrt{h} \right)^2 \right] + \exp \left[-\left(\sqrt{h^*} + \sqrt{h} \right)^2 \right] \right\} & \text{при } h^* \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $h = \alpha^2 E / 2\sigma^2$ - истинное отношение сигнал / шум.

Создание алгоритмов и системы требуется для обнаружения утечек, включая определение их местоположение и масштаб. Создание программного обеспечения используется для автоматизированного управления и мониторинга теплоэнергетической системы на основе результатов исследования. Далее необходимы проведение тестов и внедрение разработанных методов и программного обеспечения в реальные системы теплоснабжения. Проводят обучение персонала и обеспечение регулярного обслуживания системы дистанционного контроля и управления [2-4].

Изложим алгоритм для разработки метода дистанционного обнаружения утечек в системах теплоснабжения, для реализации которого необходимо выполнить следующие действия:

- формулировка математической модели для контроля параметров состояния системы теплоснабжения на основе сведений о манометрической съемке. Учитывают в этой модели факторы, которые могут влиять на параметры системы и могут быть связаны с утечками;

- разработка метода, который позволяет компенсировать отсутствие экспериментальных данных [5, 6, 7] с помощью генерации псевдоизмерений на основе имеющихся данных. Эти псевдоизмерения должны быть достаточно точными и надежными для использования в диагностических задачах;

- создание метода, который будет выполнять комплексную диагностику системы теплоснабжения. Этот метод должен включать в себя: установление факта утечки; определение местоположения утечки в системе теплоснабжения; расчет величины утечки;

- написание программного обеспечения, реализующего все описанные методы и модели. Обеспечение интерфейса для ввода и вывода данных, а также визуализации результатов. Тестирование и отладка программного комплекса;

- проведение тестовых испытаний на реальных системах теплоснабжения для проверки эффективности и точности разработанных методов и программ. Внедрение разработанных решений на практике и обучение персонала;

- после внедрения системы следует организовать мониторинг ее работы и регулярное обновление методов и программного обеспечения для обеспечения надежности и актуальности системы дистанционного обнаружения утечек.

Задачу обнаружения утечек можно сформулировать следующим образом. Допустим между двумя последовательными оценками, возникла утечка. На основе совместной обработки данных по манометрической съемке, выдается "сигнал" x_i , характеризующий величину утечки и ее местоположение в гидравлической системе (ГС), в частности, в системе теплоснабжения. Требуется установить причину изменения параметров состояния системы. Либо это изменение обусловлено возникновением утечки, либо оно связано с погрешностью (помехами) самого приемника информации



(с дисперсией σ_1), а также с помехами в ГС из-за стохастичности потребления (с дисперсией σ_2).

Статистические характеристики обнаружения можно получить по следующим выражениям. Вероятность ложной тревоги вычисляется как

$$F = \int_C^{\infty} p(h^* | 0) dh^* = 1 - \int_0^C \frac{1}{\sqrt{\pi x}} \exp(-x) dx = 2[1 - \Phi(\sqrt{2C})], \quad (6)$$

где $\Phi(\dots)$ – интеграл вероятности.

Вероятность правильного обнаружения утечки определяется как

$$D = \int_C^{\infty} p(h^* | 1) dh^* = 1 - \int_0^C \frac{1}{\sqrt{\pi x}} \left\{ \exp\left[-(\sqrt{x} - \sqrt{h})^2\right] + \exp\left[-(\sqrt{x} + \sqrt{h})^2\right] \right\} dx = 2 - \Phi(\sqrt{2C} - \sqrt{2h}) - \Phi(\sqrt{2C} + \sqrt{2h}). \quad (7)$$

Совместно с механизмом проверки двухальтернативных гипотез на основе выборки X_n , необходимо рассматривать алгоритмы последовательной и рекуррентной процедуры анализа, когда не безразличен момент принятия решения, и желательно получить результат обнаружения утечки на любом шаге наблюдения за системой. Кроме того, необходимо рассматривать алгоритмы обнаружения утечек в двух частных случаях формулировки рассматриваемой задачи. В первом случае полагается, что помехи от стохастичности потребления отсутствуют, погрешность приемника информации известна и оценке подлежит лишь амплитуда утечки.

Во втором случае известной считается дисперсия σ_1 , а искомой величиной являются помехи в системе теплоснабжения от стохастичности потребления.

Процесс диагностики утечек опишем следующим образом. Устанавливаются манометры в различных точках ГС для непрерывного мониторинга давления. Данные о давлении записываются и анализируются в реальном времени или периодически. Разрабатывается математическая модель, которая связывает изменения в данных о давлении с возможными утечками в системе. Математический приемник информации использует модель для обнаружения аномалий в данных о давлении, которые могут свидетельствовать о наличии утечек. По результатам обнаружения утечек проводится дополнительный анализ для определения местоположения и размеров утечек.

Этот метод позволяет диагностировать утечки в ГС, основываясь на изменениях в данных о давлении, и может быть эффективным способом обнаружения потенциальных проблем в системе.

Для более гибкого и адаптивного обнаружения утечек с учетом момента принятия решения и разных частных случаев формулировки задачи, можно рассмотреть следующие подходы:

- последовательная процедура обнаружения утечек;
- рекуррентная процедура анализа;
- обнаружение утечек в частных случаях.



Эти подходы требуют разработки специфических алгоритмов и моделей в зависимости от характеристик системы и требований к обнаружению утечек.

Контроль быстро изменяющихся параметров в системах теплоснабжения включает две алгоритмически взаимосвязанные задачи - статическое оценивание и диагностику утечек. Решение этих задач необходимо для эффективного управления и обеспечения безопасности таких систем. Эти задачи принадлежат к разным классам и требуют различных подходов.

Задача статического оценивания обычно связана с мониторингом параметров системы в реальном времени и оценкой их значений. Модель, основанная на физически обоснованных принципах эквивалентирования абонентских подсистем, может быть использована для определения ожидаемых значений параметров в системе. В этом контексте, статическое оценивание может включать в себя оценку давления, расхода газа, температуры и других параметров.

Задача диагностики утечек обычно связана с обнаружением и локализацией утечек в ГС. Это требует анализа изменений параметров системы и выявления аномалий, которые могут свидетельствовать о потенциальной утечке целевого продукта. Физически обоснованные модели могут быть использованы для создания базовых представлений о том, как параметры должны вести себя в нормальных условиях, что может помочь выявить аномалии.

Совместная формализация этих задач может быть сложной, так как они имеют разные цели и подходы. Эти задачи могут быть взаимосвязаны через обмен информацией и данными. Например, результаты статического оценивания, такие как аномалии в параметрах, могут использоваться как входные данные для более точной диагностики утечек.

Физически обоснованный принцип эквивалентирования абонентских подсистем предоставляет основу для разработки моделей и алгоритмов, которые могут быть использованы как в статическом оценивании, так и в диагностике утечек. Важно разрабатывать и оптимизировать такие модели и алгоритмы, чтобы обеспечивать надежный контроль и безопасность ГС.

Основные аспекты этой модели и метода могут быть кратко представлены следующим образом. Основная задача заключается в выявлении факта утечки целевого продукта, определении её местоположения и величины.

Для обнаружения ординарных утечек модель предполагает использование двухальтернативной гипотезы. Это означает, что требуется сравнить два варианта: существование утечки и отсутствие утечки. Нарушение ординарности не меняет основную структуру задачи, но может потребовать более сложных алгоритмов, так как утечка может иметь различные характеристики.

В качестве оптимального приемника информации предлагается использовать алгоритм определения местоположения и величины утечки, основанный на формализации задачи в классе динамических обратных задач анализа возмущенного состояния. Этот алгоритм предполагает использование информации о динамике системы для точной диагностики.

В случае нарушения ординарности, задача может превратиться в распознавание образов или проверку многоальтернативных гипотез, что может потребовать более сложных методов анализа данных.

Математическая модель и метод реализации задачи диагностики утечек в ГС представляют собой важное исследование для обеспечения безопасности и надежности таких систем. Математическая модель и методика диагностики утечек имеют потенциал значительно повысить эффективность и точность обнаружения утечек в ГС, обеспечивая безопасность и устойчивость таких систем.



Результаты

Разработка метода на основе проверки двухальтернативной гипотезы является распространенным методом в статистике и обработке сигналов.

В контексте обнаружения утечек в системах теплоснабжения, процесс может выглядеть следующим образом. Рассматриваются две альтернативные гипотезы: H_0 (нулевая гипотеза) и H_1 (альтернативная гипотеза). В данном случае, H_0 может представлять собой отсутствие утечек, а H_1 - наличие утечек.

Собираются данные, связанные с параметрами системы теплоснабжения, такие как давление, расход газа и другие релевантные переменные. На основе собранных данных строится статистическая модель, которая может включать в себя распределение вероятности, ожидаемые значения и дисперсии параметров. Выбирается статистический критерий, который позволяет сравнить данные с нулевой и альтернативной гипотезами.

Выводы

Система дистанционного обнаружения утечек требует регулярного мониторинга и обслуживания, чтобы обеспечить надежную работу. Решение задачи конкретного обнаружения утечек может различаться в зависимости от типа теплоснабжения и используемых технологий.

Результаты исследований будут способствовать повышению надежности и безопасности систем теплоснабжения путем обеспечения более эффективного обнаружения и контроля утечек и других аномалий в работе трубопроводных систем.

Библиографический список

1. Формирование транспортного резерва в теплоэнергетических системах / С.А. Сазонова, В.Ф. Асминин, С.Н. Кораблин, Д.А. Володкин // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2022. – № 1 (27). – С. 28-34. EDN: [TWCDZV](#)
2. Михневич И.В., Рыбаков А.В., Николенко С.Д. Конструкторское решение и технология быстровозводимого сооружения для применения в зонах чрезвычайных ситуаций // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2019. – № 1 (40). – С. 66-75. EDN: [JVFDFI](#)
3. Состояние разработок элементной базы для систем связи и управления / В.К. Зольников, А.Ю. Кулай, В.П. Крюков, С.А. Евдокимова // Моделирование систем и процессов. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 11-13. DOI: [10.12737/24575](#). EDN: [XXBBUB](#)
4. Анализ проектирования блоков RISC-процессора с учетом сбоеустойчивости / В.К. Зольников, А.С. Ягодкин, В.И. Анциферова и др. // Моделирование систем и процессов. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 56-65. DOI: [10.12737/2219-0767-2020-12-4-56-65](#). EDN: [EGIH0Y](#)
5. Асминин В.Ф., Дружинина Е.В., Болучевский А.В. Обоснование конструкции облегченной панели для переносных акустических экранов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – № 1 (27). – С. 21-26. EDN: [YQEROI](#)
6. Асминин В.Ф., Антонов А.И., Епифанов Е.Н. Использование акустических характеристик речевых пожарных оповещателей для расчёта звуковых полей помещений // Технологии технологической безопасности. – 2014. – № 1 (53). – С. 13. EDN: [TGSLIR](#)
7. Асминин В.Ф., Корда У.Ю. Об одном из путей снижения шума в сложившейся жилой застройке, прилегающей к остановочным пунктам общественного автотранспорта // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 4 (124). – С. 21-24. EDN: [NQYPIN](#)



References

1. Sazonova, S. A., Asminin, V. F., Korablin, S. N., & Volodkin, D. A. (2022). Formirovanie transportnogo rezerva v teploenergeticheskikh sistemah [Formation of a transport reserve in thermal power systems]. *Informacionnye tekhnologii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskikh sistemah*, 1 (27), 28-34. [In Russian]
2. Mihnevich, I. V., Rybakov, A. V., & Nikolenko, S. D. (2019). Konstruktorskoe reshenie i tekhnologiya bystrovozvodimogo sooruzheniya dlya primeneniya v zonah chrezvychajnyh situacij [Design solution and technology of a prefabricated structure for use in emergency zones]. *Nauchnye i obrabotatel'nye problemy grazhdanskoj zashchity*, 1 (40), 66-75. [In Russian]
3. Zol'nikov, V. K., Kulaj, A. Yu., Kryukov, V. P., & Evdokimova, S. A. (2016). Sostoyanie razrabotok elementnoj bazy dlya sistem svyazi i upravleniya [The state of development of the element base for communication and control systems]. *Modelirovanie sistem i processov*, 4(9), 11-13. <https://doi.org/10.12737/24575> [In Russian]
4. Zol'nikov, V. K., Yagodka, A. S., Anciferova, V. I., Evdokimova, S. A., Skvorcova, T. V., & YAn'kov, A. I. (2019). Analiz proektirovaniya blokov RISC-processora s uchetom sboeustojchivosti [Analysis of the design of RISC processor blocks, taking into account fault tolerance]. *Modelirovanie sistem i processov*, 4(12), 56-65. <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2020-12-4-56-65>
5. Asminin, V. F., Druzhinina, E. V., & Boluchevskij, A. V. (2017). Obosnovanie konstrukcii oblegchennoj paneli dlya perenosnyh akusticheskikh ekranov [Justification of the lightweight panel design for portable acoustic screens]. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika*, 1 (27), 21-26. [In Russian]
6. Asminin, V. F., Antonov, A. I., & Epifanov, E. N. (2014). Ispol'zovanie akusticheskikh harakteristik rechevyh pozharnyh opoveshchatelej dlya raschyota zvukovyh polej pomeshchenij [The use of acoustic characteristics of speech fire alarms to calculate the sound fields of rooms]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, 1 (53), 13. [In Russian]
7. Asminin, V. F., & Korda, U. Yu. (2011). Ob odnom iz putej snizheniya shuma v slozhivshejsya zhiloj zastrojke, prilgayushchej k ostanovochnym punktam obshchestvennogo avtotransporta [About one of the ways to reduce noise in the existing residential development adjacent to public transport stops]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 4 (124), 21-24. [In Russian]

Сведения об авторах

Сазонова Светлана Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: ss-vrn@mail.ru, ORCID: [0000-0001-8626-7723](https://orcid.org/0000-0001-8626-7723).

Кораблин Сергей Николаевич, аспирант, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: korablin2015@inbox.ru.

Мозговой Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра техносферной и пожарной безопасности, ВГТУ, e-mail: nv_moz@mail.ru.

Authors about

Sazonova Svetlana Anatolyevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: ss-vrn@mail.ru, ORCID: [0000-0001-8626-7723](https://orcid.org/0000-0001-8626-7723).

Korablin Sergey Nikolaevich, postgraduate student, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: korablin2015@inbox.ru.

Mozgovoy Nikolay Vasilyevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Technospheric and Fire Safety, Voronezh State Technical University, e-mail: nv_moz@mail.ru.



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ELECTRIC POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING



ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Жилин Е.В.^{1,3}, Долгаль С.В.², Малышева А.Д.³

¹НИТУ МИСИС, г. Москва

² Филиал ПАО «Россети Центр» – «Воронежэнерго», г. Воронеж

³БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

В работе исследуется возможность использования накопителей электроэнергии различных типов в энергетических системах. Проводится сравнительный анализ таких типов накопителей как: электрохимические, электрические, электромагнитные, механические. Анализируются свойства свинцово-кислотных, никель-кадмиевых, натрий-серных, литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов, сверхпроводящих магнитов, кинетических накопителей с выявлением преимуществ и недостатков их использования; рассматриваются области их применения. Рассматривается возможность интеграции накопителей с возобновляемыми источниками энергии. Выполняется анализ усредненных графиков нагрузки для зимнего и летнего периодов; обосновывается актуальность использования накопителя для сглаживания пиков графиков нагрузки потребления. Предлагается схемное решение подключения накопителя электроэнергии с системой управления для сети электроснабжения среднего класса напряжения. Подключение накопителя в такой системе предусмотрено на стороне 0,4 кВ с использованием преобразовательных устройств. Использование AC-DC преобразователя с системой управления в такой системе осуществляет регулирование потоков активной мощности с тем, выполняя двустороннее преобразование энергии в случае накопления энергии накопителем и отдачи энергии в сеть.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, система управления накопителем, альтернативная энергетика, возобновляемые источники энергии, повышение энергоэффективности, система электроснабжения.

THE PERSPECTIVES OF ELECTRIC POWER STORAGE DEVICES USING IN ENERGY SYSTEMS

Evgenij Zhilin^{1,3}, Stanislav Dolgal², Alvina Malysheva³

¹National University of Science and Technology «MISIS», Russia, Moscow

²PJSC «Rosseti Center «Voronezhenergo», Voronezh

³Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract

This paper explores the possibility of using different types of electric power storage devices in energy systems. A comparative analysis of such types of storage devices as: electrochemical, electrical, electromagnetic, mechanical. The properties of lead-acid, nickel-cadmium, sodium-sulfur, lithium-ion batteries, supercapacitors, superconducting magnets, kinetic storage devices are analyzed with the identification of advantages and disadvantages of their use; the fields of their application are considered. The possibility of integrating storage devices with renewable energy sources is being considered. The analysis of the averaged load schedules for the winter and summer periods is performed; the feasibility of using the drive to smooth out the peaks of the consumption load schedules is justified. A schematic solution for connecting an electric power storage device with a control system for a medium-voltage power supply network is proposed. The connection of the drive in such a system is provided on the 0.4 kV side using converter devices. The using of an AC-DC converter with a control system in such a system regulates the flows of active power in order to perform a two-way



energy conversion in the case of energy accumulation by the storage device and energy return to the network.

Keywords: alternative energy, renewable energy sources, energy storage, energy efficiency improvement, power supply system, storage management system.

Введение

В современном мире, охваченном стремительным развитием технологий и повышенным спросом на энергию, проблема эффективного хранения и использования электроэнергии становится одним из ключевых вопросов энергетики [1, 2]. Энергетические системы сталкиваются с вызовами, связанными с внедрением в производство энергии возобновляемых источников, которые являются причиной нестабильности в сетях электроснабжения, и потребительскими требованиями к поставкам энергии [3]. В этом контексте роль накопителей электроэнергии становится все более важной и актуальной [4].

Накопители электроэнергии представляют собой технологические системы, предназначенные для сбора и хранения электрической энергии с целью последующего ее использования. Их внедрение в энергетические системы может значительно улучшить энергоэффективность системы электроснабжения, обеспечить стабильность в энергосистеме и смягчить воздействие периодов пониженной генерации [5].

Цель исследования – провести анализ различных типов и перспектив применения накопителей электроэнергии в электроэнергетических системах.

Существует множество различных технологий накопления электроэнергии, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками [6-9]. Наиболее распространенные типы систем накопления электроэнергии представлены на рис. 1.

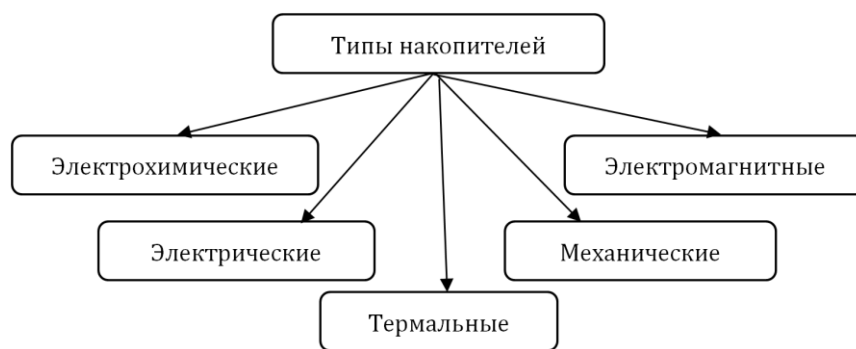


Рис. 1. Типы накопителей электроэнергии

В табл. 1 приведены характеристики различных типов накопителей электроэнергии; выполнено сравнение их химических и физических свойств.

К электрохимическим накопителям относится один из самых распространенных и широко используемых типов накопителей электроэнергии – литий-ионные аккумуляторные батареи [10]. При малых массо-габаритных показателях они характеризуются простотой управления; обеспечивают высокую энергетическую плотность и длительный срок службы (табл. 1). Такие аккумуляторы нашли широкое применение в электромобилях, портативных устройствах и стационарных энергетических системах. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи также используются для хранения электрической энергии, но имеют ограничения по своей массе и объему [11, 12].

Суперконденсаторы обладают высокой мощностью и длительным сроком службы за счет устойчивости к большим токам, а также способны осуществлять быстрый перезаряд. Этот тип накопителей находит свое применение в сфере транспорта, особенно в тех случаях, когда требуется эффективное управление энергией во время торможения и ускорения. Графеновые суперконденсаторы обладают высокой плотностью энергии и способны поддерживать высокую мощность, что делает их идеальными для электрических транспортных средств [13, 14].



Таблица 1

Характеристики накопителей электроэнергии

Тип накопителя	Преимущества	Недостатки
1. Электрохимические аккумуляторы		
Свинцово-кислотные (Lead-Acid)	– относительно низкая скорость саморазряда	– низкая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – опасные материалы
Никель-кадмиевые (Ni-Cd)	– высокая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – широкий температурный диапазон эксплуатации	– крупногабаритные; – пожароопасны; – высокий уровень саморазряда
Натрий-серные (Sodium-sulfur)	– высокая энергетическая плотность (Вт·ч/л); – быстрая реакция системы на внешнее воздействие; – большое количество рабочих циклов	– пожарная опасность расплавленного натрия;
Литий-ионные (Li-Ion)	– высокая энергетическая плотность (до 400 Вт·ч/л); – большее количество рабочих циклов в сравнении с другими типами АКБ	– относительно высокая стоимость; – возможность перегрева
2. Электрические		
Суперконденсаторы	– неограниченное число рабочих циклов; – выдерживают большие токи	– достаточно высокая стоимость; – высокая скорость саморазряда; – низкая удельная плотность энергии (Дж/кг)
3. Электромагнитные		
Сверхпроводящие магниты и катушки	– быстрая отдача накопленной энергии; – высокая скорость перезаряда; – долгий срок эксплуатации	– низкая плотность энергии (Вт·ч/л); – высокая стоимость сверхпроводящих материалов
4. Механические		
Кинетические накопители	– быстрая реакция системы на внешнее воздействие; – низкие требования в техническом обслуживании; – долгий срок эксплуатации	– крупногабаритные; – переменная скорость вращения по мере отдачи энергии; – дополнительные требования к точности регулирования
5. Термальные		
Тепловые аккумуляторы переменной температуры	– линейный процесс изменения температуры при процессах перезаряда; – высокая теплопроводность ($> 0,3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$); – полная обратимость в течение всего срока службы накопителя	– зависимость от физических свойств среды хранения (материала); – ограниченные температурные диапазоны (в сравнении с электрохимическим типом)
Латентные	– высокая плотность энергии (Вт·ч/л)	– высокая стоимость системы; – возможность переохлаждения; – низкая теплопроводность



Сверхпроводящие магниты накапливают энергию магнитного поля, создаваемого током, который циркулирует в сверхпроводящей катушке. При температурах ниже критического значения перехода электрическое сопротивление сверхпроводника падает до нуля, что позволяет магниту пропускать большие токи без омических потерь. При зарядке устройства ток увеличивается, что приводит к увеличению плотности магнитного поля, и наоборот. Помимо катушки, устройство электромагнитного накопителя включает в себя холодильную подсистему, блок кондиционирования электроэнергии, а также подсистему мониторинга и управления. Такая система обладает высоким КПД (до 95%), длительным сроком службы (более 100 000 циклов), высокой удельной мощностью (более 2000 Вт/кг для сверхпроводящих магнитов) и быстрым временем отклика (до 1 мс). Это делает ее подходящим решением для систем с высокой мощностью и быстрым временем отклика (систем повышения качества и стабильности питания, источников бесперебойного питания и энергетических сетей [15]).

Принцип работы кинетического накопителя (маховика) основан на механической инерции вращающегося тела; кинетическая энергия накапливается в роторе, который, представляет собой большой вращающийся цилиндр, изготовленный из композитных материалов или сплава. В некоторых случаях ротор может представлять собой ленту, намотанную в направлении вращения [16].

Термальные накопители используют различные тепловые процессы для хранения энергии. Это может быть тепловое хранение в материалах с фазовыми переходами, тепловые насосы или системы теплового аккумулирования. Такие накопители часто применяются в системах с возобновляемыми источниками, для генерации в сеть электроэнергии и тепла [17].

Одним из перспективных направлений является сочетание накопителей электроэнергии с возобновляемыми источниками электрической энергии. Солнечные батареи эффективно выполняют одностороннее преобразование, но их основной недостаток заключается в непостоянстве выработки энергии в течение дня из-за внешних факторов, к примеру, таких как облачность. Внедрение накопителей решает эту проблему, аккумулируя избыточную энергию в периоды высокой продуктивности и отдавая ее в сеть в периоды низкой продуктивности солнечных батарей. Еще одним направлением является интеграция накопителей с ветрогенераторами. Подобно солнечным батареям, ветрогенераторы генерируют переменную энергию, и использование накопителей позволяет сбалансировать динамические процессы при производстве электроэнергии, обеспечивая стабильность в энергетической системе [18].

Несмотря на такие недостатки литий-ионных аккумуляторных батарей как высокая стоимость, подверженность перегреву и возможность внутренних коротких замыканий при процессе перезаряда, данный тип аккумуляторных батарей получил наиболее широкое распространение в энергетических системах.

Материалы и методы

Использование накопителей электроэнергии в энергетических системах позволяет модернизировать сеть электроснабжения без реконструкции сети, а также решить проблему с часами повышенного спроса на электроэнергию.

Применение накопителей электроэнергии способствует сглаживанию пиков потребления графиков нагрузки (рис. 1), повышению устойчивости переходных процессов в системах электроснабжения [19].

На графиках нагрузки сети электроснабжения (рис. 1) можно выделить неравномерные участки; характер потребления резкопеременный; имеют место резкое увеличение и провалы.



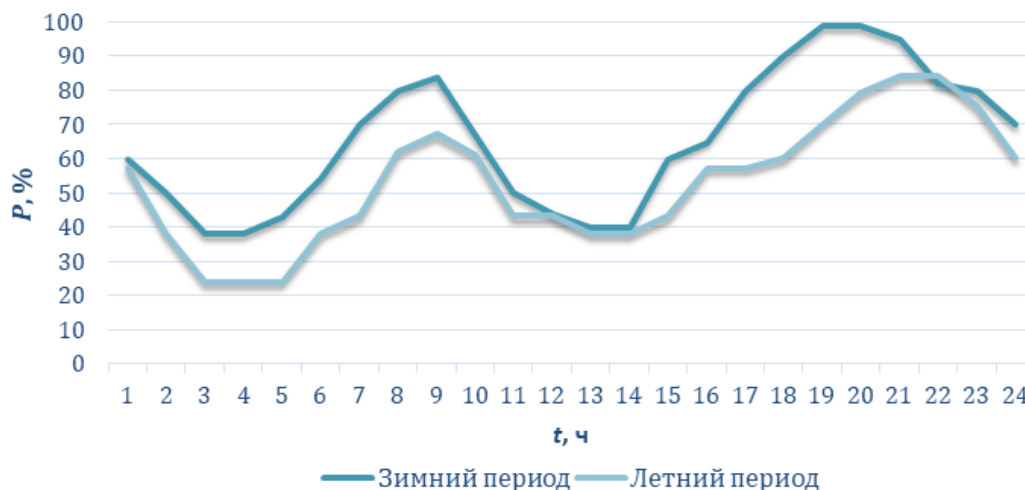


Рис. 1. Усредненные почасовые значения потребления электрической мощности в сети электроснабжения в зимний и летний периоды

Для рис. 1 можно определить коэффициент неравномерности графиков нагрузки как¹:

$$\alpha = P_{\min}/P_{\max}, \quad (1)$$

где $P_{\min}$, $P_{\max}$ – минимальное значение мощности потребления суточного графика нагрузки, %; – максимальное значение мощности потребления суточного графика нагрузки, %.

Для использования накопителя электроэнергии в качестве устройства хранения энергии в составе энергетической системы необходимо выполнить анализ определенных технических параметров накопителя, таких как:

- номинальная емкость (А·ч);
- номинальное выходное напряжение (В);
- максимальный выходной ток (А);
- количество рабочих циклов (шт).

Исходя из вышеприведенных параметров выбирается накопитель согласно требованиям и характеристикам энергетической системы.

В данной работе анализ возможности подключения накопителя электроэнергии к энергетической системе выполнен для сети электроснабжения 10/0,4 кВ. На рис. 2 приведен участок схемы электроснабжения сети 10 кВ с подключенным накопителем электроэнергии.

Как показано на схеме электроснабжения (рис. 2) подключение накопителя электроэнергии, представленного литий-ионной аккумуляторной батареей АБ, выполняется на стороне 0,4 кВ посредством AC-DC преобразователя с системой управления СУ (рис. 3), которая синхронизирует работу накопителей электроэнергии с сетью. Преобразователь энергии используется для преобразования энергии переменного тока в постоянный в случае накопления энергии накопителем; и обратного преобразования в случае отдачи энергии в сеть для питания бытовых и электротехнических устройств. Принцип работы системы управления накопителем электроэнергии заключается в том, чтобы максимизировать эффективность использования накопителя и обеспечить его надежную работу.

¹ ГОСТ 19431-2023. Энергетика и электрификация. Термины и определения. Введ. в действие Приказом Росстандарта от 24 октября 2023 г. № 1218-ст: взамен ГОСТ 19431-84: дата введ. 1 декабря 2023 г. – 12 с.



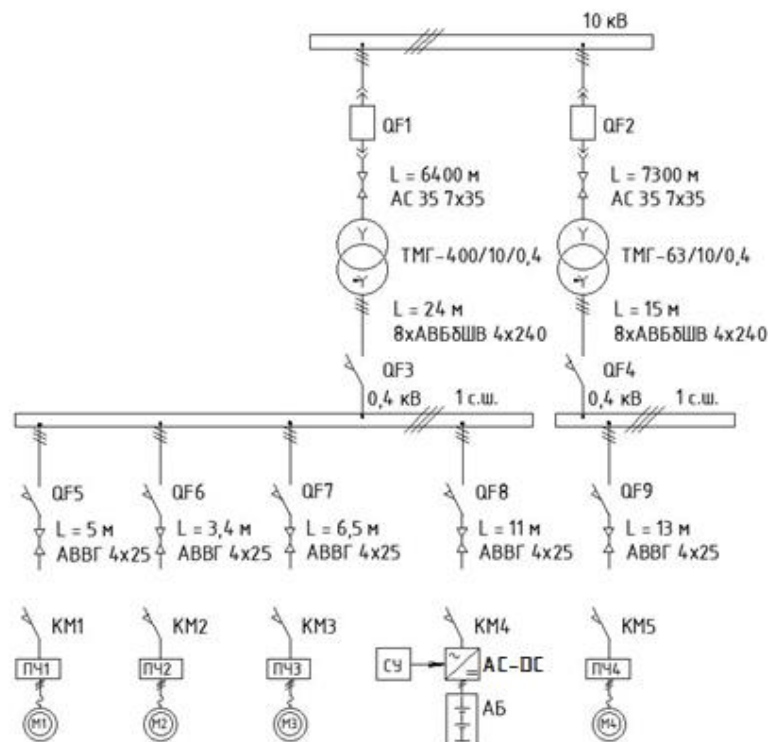


Рис. 2. Схема электроснабжения сети 10 кВ с подключенным накопителем электроэнергии

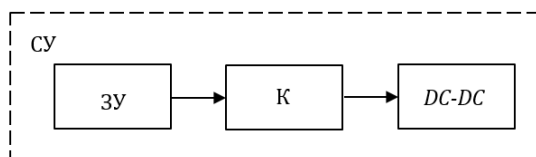


Рис. 3. Устройство системы управления

Система управления накопителями электроэнергии, представленная на рис. 3, включает в себя следующие элементы: зарядное устройство ЗУ, контроллер управления К и DC-DC-преобразователь, который выполняет функцию синхронизации накопителя с сетью 0,4 кВ по напряжению. Зарядное устройство заряжает накопитель от источника электропитания – сети электроснабжения. Контроллер управления является центральным устройством системы управления накопителем электроэнергии. Он состоит из микроконтроллера, датчиков, программируемой логики и соединительных интерфейсов. Контроллер собирает данные от датчиков о состоянии накопителя, управляет работой инвертора и зарядного устройства, а также принимает решения об оптимальном использовании накопителя в соответствии с требованиями системы. Контроллер управления отслеживает состояние накопителя и определяет, когда его следует заряжать, а когда – использовать сохраненную энергию. Он также осуществляет управление потреблением энергии в системе, чтобы снизить пиковые нагрузки и улучшить качество электроснабжения.

Результаты

Растущее использование накопителей электроэнергии в течение последнего десятилетия привело к совершенствованию технологий, топологий и методов управления накопителями. Основываясь на проведенных исследованиях, можно сделать вывод



о некоторых очевидных и других более спорных тенденциях. Несмотря на то, что электрохимические накопители хорошо зарекомендовала себя в энергосистемах, все еще существуют некоторые проблемы, которые необходимо решить при их использовании в энергетических системах. Наблюдается растущая тенденция в использовании литий-ионных аккумуляторных батарей в качестве элемента управляемой системы накопления электроэнергии из-за их длительного срока службы и высокой энергетической плотности. Использование свинцово-кислотных никель-кадмиевых и натрий-серных аккумуляторных батарей для энергетических систем большой мощности не представляется возможным из-за их пожароопасности аккумуляторов данных типов.

Использование суперконденсаторов для накопления энергии в энергетических системах наибольший интерес представляет при совместном использовании с другим типом накопителя, к примеру, таким как литий-ионный аккумулятор.

Для заключения о влиянии каждого из типов накопителей на энергетическую систему необходимо проведение дополнительного исследования. Анализ характеристик накопителей (табл. 2) показал наиболее доступным и эффективным к использованию литий-ионный тип аккумуляторных батарей.

Выводы

В статье были рассмотрены различные типы накопителей электроэнергии, такие как электрохимические, электрические, электромагнитные, механические и тепловые системы. Исследование этих технологий является ключевым шагом в создании более эффективных и универсальных энергетических систем.

Особое внимание уделено системам управления, регулирующим процессы заряда, разряда и хранения электроэнергии. Эффективные системы управления являются критическим компонентом для обеспечения надежной и стабильной работы накопителей. Для максимизации производительности и продолжительности службы накопителей необходимо совершенствовать системы управления. Это включает в себя разработку более точных алгоритмов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и эффективно реагировать на динамику потребления электроэнергии.

Для детального исследования процессов взаимодействия накопителей с энергетическими системами необходимо применение имитационного моделирования. Использование современных инструментов моделирования позволяет предсказывать поведение системы в различных сценариях и оптимизировать ее работу.

Развитие систем управления также направлено на повышение устойчивости и надежности работы накопителей электроэнергии. Это необходимо для обеспечения синхронизации их с сетью, стабильности энергосистем и удовлетворения роста потребления нагрузок.

Библиографический список

1. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Эрдили Н.И. Повышение эффективности использования возобновляемых источников энергии в составе виртуальной электростанции на основе мультитентного управления // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 103-113. DOI: [10.47026/1810-1909-2022-3-103-113](https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113). EDN: [HDVPGG](https://www.edn.ru/HDVPGG)
2. Белоусов А.В., Жилин Е.В., Прасол Д.А. Разработка имитационной модели распределительной электрической сети 10 кВ для исследования возможности применения систем накопления электроэнергии с целью повышения энергоэффективности // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 10. – С. 45-54. EDN: [UHUTFS](https://www.edn.ru/UHUTFS)
3. Анализ влияния возобновляемых источников энергии с силовыми преобразователями на процессы в современных энергосистемах / Н.Ю. Рубан, А.Б. Аскаров, М.В. Андреев и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.



- Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 36. – С. 7-30. DOI: [10.15593/2224-9397/2020.4.01](https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01). EDN: [WNUSQG](https://www.edn.ru/WNUSQG)
4. Доброго К.В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 215-232. DOI: [10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232](https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232). EDN: [AVOTEY](https://www.edn.ru/AVOTEY)
 5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Исследование режимов работы изолированной системы электроснабжения с управляемыми установками распределенной генерации, накопителями электроэнергии и двигательной нагрузкой // Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 184-194. DOI: [10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194). EDN: [DUEYAC](https://www.edn.ru/DUEYAC)
 6. Eroğlu F., Kurtoglu M., Vural A. M. Bidirectional DC–DC converter based multilevel battery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review considering different topologies, state-of-charge balancing and future trends // IET Renewable Power Generation. – 2021. – Vol. 15, Is. 4. – P. 915-938. DOI: [10.1049/rpg2.12042](https://doi.org/10.1049/rpg2.12042)
 7. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Изолированная система электроснабжения с энергетическими роутерами и возобновляемыми источниками // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 124-134. DOI: [10.22213/2413-1172-2021-2-124-134](https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-2-124-134). EDN: [VUQWJO](https://www.edn.ru/VUQWJO)
 8. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 33-40. DOI: [10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40](https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40). EDN: [KSXNJW](https://www.edn.ru/KSXNJW)
 9. Beeker É., Lavergne R. Le stockage de l'électricité: la solution à l'intégration des EnR intermittentes? // Annales des Mines-Responsabilité et environnement. – 2019. – Vol. 93, Is. 1. – P. 33-40. DOI: [10.3917/re1.093.0033](https://doi.org/10.3917/re1.093.0033)
 10. Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions / M. Chen, Y. Zhang, G. Xing et al. // Energy & Environmental Science. – 2021. – Vol. 14, Is. 6. – P. 3323-3351. DOI: [10.1039/D1EE00271F](https://doi.org/10.1039/D1EE00271F)
 11. Yudhistira R., Khatiwada D., Sanchez F. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 358. – P. 13199. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.131999](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999)
 12. A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries / He S., Wang S., Chen H. et al. // Journal of Materials Chemistry A. – 2020. – Vol 8, Is. 5. – P. 2571-2580. DOI: [10.1039/C9TA12660K](https://doi.org/10.1039/C9TA12660K)
 13. Yang Z., Zhu F., Lin F. Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – Vol. 22, Is. 2. – P. 1150-1160. DOI: [10.1109/IESES53571.2023.10253686](https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686)
 14. Korkmaz S., Kariper İ. A. Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications // Journal of Energy Storage. – 2020. – Vol. 27. – P. 101038. DOI: [10.1109/IESES53571.2023.10253686](https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686)
 15. Zimmermann A.W., Sharkh S.M. Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage // Energy Reports. – 2020. – Vol. 6. – P. 180-188. DOI: [10.1016/j.egyr.2020.03.023](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023)
 16. Andriyanov S.D., Zhuravleva L.A. Electric Drive of Kinetic Energy Storage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok: IEEE, 2020. – P. 9271185. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185). EDN: [FGJKCU](https://www.edn.ru/FGJKCU)
 17. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review / H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordeghah et al. // International Journal of Thermofluids. – 2020. – Vol. 5. – P. 100039. DOI: [10.1016/j.ijft.2020.100039](https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039)
 18. Юферев Л.Ю. Разработка базового источника напряжения для микросети на возобновляемых источниках энергии // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Том 68, № 1(42). – С. 39-43. DOI: [10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43](https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43). EDN: [LEOYXT](https://www.edn.ru/LEOYXT)



19. Рыжова Е.Л. Повышение энергоэффективности на железнодорожном транспорте путем применения систем накопления энергии // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 2(22). – С. 36-48. DOI: [10.46960/2658-6754_2023_2_36](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_36). EDN: [BIOAFN](https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_36)

References

- Sosnina, E. N., Shaluho, A. V., & Jerdili, N. I. (2022). Povyshenie jeffektivnosti ispol'zovaniya vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии v sostave virtual'noj jelektrostantsii na osnove mul'tia-gentnogo upravlenija [Increasing the efficiency of using renewable energy sources as part of a virtual power plant based on multi-agent control]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 3, 103-113. <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2022-3-103-113> [In Russian]
- Belousov, A. V., Zhilin, E. V., & Prasol D. A. (2022). Razrabotka imitacionnoj modeli raspredeli-tel'noj jelektricheskoy seti 10 kV dlja issledovaniya vozmozhnosti primeneniya sistem nakoplenija jel-ektroenerгии s cel'ju povysheniya jenergojeffektivnosti [Development of a simulation model of a 10 kV electrical distribution network to study the possibility of using electricity storage systems to improve energy efficiency]. *Jelektroobo-rudovanie: jekspluatacija i remont*, No 10, 45-54. [In Russian]
- Ruban, N. Ju., Askarov, A. B., Andreev, M. V., Kievec, A. V., & Rudnik, V. E. (2020). Analiz vlijanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии s silovymi preobrazovateljami na processy v sovremen-nyh jenergosistemah [Analysis of the influence of renewable energy sources with power con-verters on processes in modern energy systems]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issle-dovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jelektrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija*, 36, 7-30. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.4.01> [In Russian]
- Dobrego K. B. (2023). K voprosu sozdaniya gibridnyh sistem nakoplenija jelektroenerгии [On the is-sue of creating hybrid electricity storage systems]. *Jenergetika. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij i jenergeticheskikh ob#edinenij SNG*, 66(3), 215-232. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232> [In Russian]
- Bulatov, Ju. N., Krjukov, A. V., & Suslov, K. V. (2021). Issledovanie rezhimov raboty izolirovannoj sis-temy jelektrosnabzhenija s upravljaemymi ustanovkami raspredelennoj generacii, nakopiteljami jelektroenerгии i dvigatel'noj nagruzkoj [Study of operating modes of an isolated power supply system with controlled distributed generation installations, electricity storage devices and mo-tor load]. *Problemy jenergetiki*, 23(5), 184-194. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-184-194> [In Russian]
- Eroğlu, F., Kurtoğlu, M., & Vural, A.M. (2021). Bidirectional DC–DC converter based multilevel bat-tery storage systems for electric vehicle and large-scale grid applications: A critical review con-sidering different topologies, state-of-charge balancing and future trends. *IET Renewable Power Generation*, 15(5), 915-938. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12042>
- Bulatov, Ju. N., Krjukov, A. V., & Suslov, K. V. (2021). Izolirovannaja sistema jelektrosnabzhenija s jenergeticheskimi routerami i vozobnovljaemymi istochnikami [Isolated power supply system with energy routers and renewable sources]. *Vestnik IzhGTU ime-ni M.T. Kalashnikova*, 24(2). 124-134. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-2-124-134> [In Russian]
- Muhametova L. R., Ahmetova I. G., & Strielkovski V. (2019). Innovacii v oblasti hraneniya jenerгии [In-novation in Energy Storage]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki*, 21(4), 33-40. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-33-40> [In Russian]
- Beeker, É., & Lavergne, R. (2019). Le stockage de l'électricité: la solution à l'intégration des EnR in-termittentes?. *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, 93(1), 33-40. <https://doi.org/10.3917/re1.093.0033> [In French]
- Chen, M., Zhang, Y., Xing, G., Chou, S. L., & Tang, Y. (2021). Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions. *Energy & Environmental Science*, 14(6), 3323-3351. <https://doi.org/10.1039/D1EE00271F>
- Yudhistira, R., Khatiwada, D., & Sanchez, F. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131999.



<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999>

12. He, S., Wang, S., Chen, H., Hou, X., & Shao, Z. (2020). A new dual-ion hybrid energy storage system with energy density comparable to that of ternary lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 8(5), 2571-2580. <https://doi.org/10.1039/C9TA12660K>
13. Yang, Z., Zhu, F., & Lin, F. (2020). Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(2), 1150-1160. <https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686>
14. Korkmaz, S., & Kariper, İ. A. (2020). Graphene and graphene oxide based aerogels: Synthesis, characteristics and supercapacitor applications. *Journal of Energy Storage*, 27, 101038. <https://doi.org/10.1109/IESES53571.2023.10253686>
15. Zimmermann, A. W., & Sharkh, S. M. (2020). Design of a 1 MJ/100 kW high temperature superconducting magnet for energy storage. *Energy Reports*, 6, 180-188. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.03.023>
16. Andriyanov, S. D., & Zhuravleva, L. A. (2020, October). Electric Drive of Kinetic Energy Storage. In *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271185>
17. Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordeghah, N., Ahmad, D., & Lipinski, T. (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
18. Juferev L.Ju. (2021). Razrabotka bazovogo istochnika naprjazhenija dlja mikroseti na vozobnovljaemyh istochnikah jenerгии [Development of a basic voltage source for a microgrid using renewable energy sources]. *Jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie v APK*, 68(1). 39-43. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2021-68-1-39-43> [In Russian]
19. Ryzhova E.L. (2023). Povyshenie jenergojeffektivnosti na zheleznodorozhnom transporte putem primeneniya sistem nakoplenija jenerгии [Increasing energy efficiency in railway transport through the use of energy storage systems]. *Intellectual'naja jelektrotehnika*, 2(22). 36-48. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_2_36 [In Russian]

Сведения об авторах

Жилин Евгений Витальевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, e-mail: zhilinevg@mail.ru.

Долгаль Станислав Владимирович, диспетчер, участок оперативного технологического управления основной сетью диспетчерской службы центра управления сетями, филиал ПАО «Россети Центр» – «Воронежэнерго».

Малышева Альвина Дмитриевна, аспирант, кафедра технической кибернетики, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, e-mail: kuznetsova.alvina@yandex.ru.

Authors about

Zhilin Evgeny Vitalievich, Cand. of Tech. Sciences, associate professor, Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry Department, National University of Science and Technology «MISIS», e-mail: zhilinevg@mail.ru.

Dolgal Stanislav Vladimirovich, dispatcher, a site for operational technological management of the main network of the dispatching service of the network management center, PJSC «ROSSETI Center «Voronezhenergo».

Malysheva Alvina Dmitrievna postgraduate student, Technique Cybernetics Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, e-mail: kuznetsova.alvina@yandex.ru.



КОНЦЕПЦИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ

Прасол Д.А., Саенко А.А.

БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород

Аннотация

Работа посвящена актуальной теме применения цифровых технологий и решений в современной электроэнергетике и концепции цифровой трансформации электрической энергии. Рассматривается вопрос организации и построения цифровых подстанций, как одного из ведущих направлений в современной электроэнергетике. В работе приведены основные технические и организационные решения, характерные для построения цифровых подстанций на базе открытых протоколов международного стандарта МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях». Дается общая оценка состояния понизительных подстанций в энергосистеме Белгородской области. В качестве объекта исследования приводится и анализируется схема одной из типовых подстанций в энергосистеме Белгородской области. Для рассмотренной подстанции предложена концепция её модернизации с применением цифровых технологий и решений для соответствия термину «Цифровая подстанция» и в соответствии с требованиями международного стандарта МЭК 61850. Причем концепция модернизации предлагается как с учетом достижения необходимых функций управления подстанцией, так и в соответствии существующим уровнем отечественной энергетической промышленности и состоянием электрических сетей региона. Предложенная модернизация приведет к повышению уровня управляемости и наблюдаемости подстанции, уменьшению затрат на мониторинг и самодиагностику вторичных связей, поднятию уровня интеллектуального управления режимом работы силового оборудования и вторичных систем. Кроме этого она обеспечит поэтапную модернизацию действующих подстанций региона в направлении их цифровизации.

Ключевые слова: цифровая подстанция, стандарт МЭК 61850, цифровая трансформация 2030, интеллектуальные электронные устройства, локальная вычислительная сеть, релейная защита и автоматика.

THE CONCEPT OF MODERNIZING ELECTRICAL SUBSTATIONS IN THE ENERGY SYSTEM OF THE BELGOROD REGION USING DIGITAL TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS

Dmitriy Prasol, Andrey Saenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod

Abstract

The work is devoted to the current topic of using digital technologies and solutions in modern electric power industry and the concept of digital transformation of electrical energy. The issue of organizing and constructing digital substations is considered as one of the leading trends in the modern electric power industry. The paper presents the main technical and organizational solutions typical for the construction of digital substations based on open protocols of the international standard IEC 61850 "Networks and communication systems in substations." A general assessment of the condition of step-down substations in the power system of the Belgorod region is given. As an object of study, the diagram of one of the typical substations in the power system of the Belgorod



region is presented and analyzed. For the considered substation, a concept for its modernization has been proposed using digital technologies and solutions to comply with the term "Digital Substation" and in accordance with the requirements of the international standard IEC 61850. Moreover, the modernization concept is proposed both taking into account the achievement of the necessary substation control functions, and in accordance with the existing level domestic energy industry and the state of the region's electrical networks. The proposed modernization will lead to an increase in the level of controllability and observability of the substation, a reduction in the costs of monitoring and self-diagnosis of secondary connections, and an increase in the level of intelligent control of the operating mode of power equipment and secondary systems. In addition, it will ensure the gradual modernization of existing substations in the region in the direction of their digitalization.

Keywords: digital substation, IEC 61850 standard, digital transformation 2030, intelligent electronic devices, local area network, relay protection and automation.

Введение (Introduction)

Цифровые технологии давно и прочно вошли во многие сферы человеческой деятельности, не является исключением и электроэнергетика.

Во исполнение указа Президента РФ от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы» разработана и утверждена советом директоров ПАО «Россети» концепция «Цифровая трансформация 2030». Эта концепция предполагает полное преобразование энергетической электросетевой инфраструктуры до 2030 года посредством внедрения цифровых технологий. Данный переход к цифровым технологиям и решениям, которые применяются на электрических подстанциях и в распределительных электрических сетях, является одним из ведущих направлений в современной электроэнергетике [1–3].

Одной из важнейших технологических составляющих цифровой трансформации электросетевого комплекса является цифровая подстанция. Цифровой подстанцией называется подстанция, в которой всё оборудование находится в единой цифровой среде, то есть подключено к одной сети, а организация по передаче, приёму и управлению потоками информации при решении задач мониторинга, анализа и удалённого управления технологическими процессами осуществляется в цифровой форме в режиме единого времени на базе открытых протоколов международного стандарта МЭК 61850 [4].

Термин «Цифровая подстанция» неразрывно связан с международным стандартом МЭК 61850 «Сети и системы связи на подстанциях», который описывает форматы потоков данных, виды информации, правила описания элементов энергообъекта, стандартизирует язык конфигурирования подстанций, устройств и функций [5]. Стандарт распространяется на строительство новых подстанций, а также на реконструкцию и техническое перевооружение действующих подстанций.

Материалы и методы (Materials and Methods)

Работа и управление цифровыми подстанциями базируется на программно-техническом комплексе цифровой подстанции (ПТК ЦПС) [5, 6], который подразделяется на 3 структурных уровня:

- уровень подстанции;
- уровень присоединения;
- уровень процесса.

Структурные уровни объединяются между собой посредством сегментов локально-вычислительной сети (ЛВС) Ethernet. Сегменты ЛВС образуют шину процесса, объединяющую уровни процесса и присоединения, и шину подстанции, объединяющую



уровни присоединения и подстанции (рис. 1). Инструментами объединения различного оборудования подстанции в её информационную систему являются следующие протоколы:

- MMS (МЭК 61850-8-1) – для интеграции оборудования в систему АСУ ТП;
- GOOSE (МЭК 61850-8-1) – для передачи дискретной информации между терминалами РЗА и первичным оборудованием;
- SV (МЭК 61850-9-2) – для передачи оцифрованных аналоговых измерений.

Таким образом, основная идея цифровой подстанции заключается в организации всех информационных потоков взаимодействия систем мониторинга, анализа и удалённого управления в цифровой форме.

В энергосистеме Белгородской области продолжается процесс модернизации электрических подстанций. С каждым годом становится больше системообразующих питающих центров, которые управляются дистанционно. Каждый такой проект на один шаг приближает отрасль к цифровой электроэнергетике будущего.

С другой стороны, в энергосистеме Белгородской области имеется ряд действующих подстанций, срок эксплуатации которых, превышает полный установленный срок службы для трансформаторной подстанции, который нормируется нормативной документацией. Такие подстанции нуждаются в реконструкции и техническом перевооружении с переходом на микропроцессорную элементную базу и единый цифровой стандарт. Данные мероприятия связаны с физическим и моральным устареванием энергетического оборудования, которое выработало свой ресурс, и дальнейшая его эксплуатация не гарантирует высокой надёжности и безопасности электроснабжения. Значительный износ электрооборудования может приводить к частым отключениям потребителей электроэнергии. Кроме того, существует риск возникновения аварийных ситуаций из-за наличия масляной изоляционной среды в некоторых видах оборудования, что может привести к взрыво- и пожароопасности. Эксплуатационные и ремонтные издержки, установленного на подстанциях оборудования уже давно вышли за допустимые рамки. Передача аналоговых данных между первичным и вторичным оборудованием на таких подстанциях осуществляется при помощи медных кабельных связей, что приводит к увеличению суммарной длины электрических кабелей. Также на данных энергообъектах различные подсистемы используют большое количество различных коммуникационных стандартов (протоколов), усложняющих процесс передачи данных [7].

Реализация основных идей и принципов построения цифровой подстанции, в соответствии со стандартом МЭК 61850, предлагается к рассмотрению на примере типовой понизительной подстанции энергосистемы Белгородской области классом напряжения 110 кВ, для которой также характерны указанные выше недостатки. Такая подстанция предназначена для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей. По способу присоединения к энергосистеме подстанция является проходной, включается в расщелку одной линии с двусторонним питанием.

Подстанция состоит из следующих основных узлов: открытого распределительного устройства 110 кВ (ОРУ 110 кВ) и комплектного распределительного устройства наружной установки 10 кВ (КРУН 10 кВ), которые связаны между собой через два силовых двухобмоточных трансформатора связи Т1 и Т2; силовых коммутационных аппаратов (высоковольтных выключателей, разъединителей и заземляющих ножей), посредством которых осуществляется подключение всех присоединений в РУ к общим участкам токоведущих шин (сборным шинам); устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА и ПА), выполненных на аналоговых электромеханических реле; ячейки телемеханики и связи; помещения общеподстанционного пункта управления (ОПУ) (рис. 2).



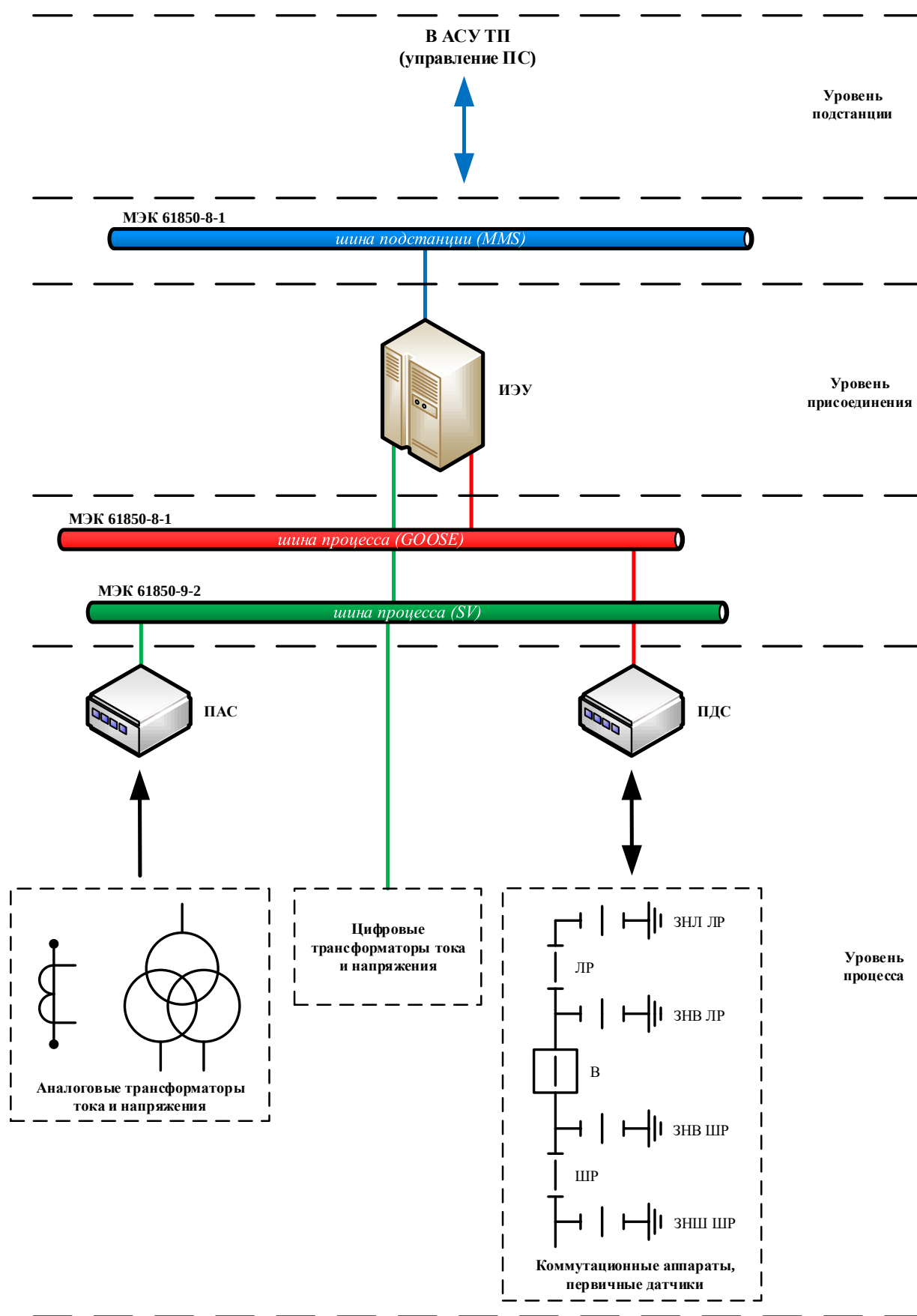


Рис. 1. Структурные уровни и шины цифровой подстанции



ОРУ 110 кВ выполнено по схеме «мостик» с масляными выключателями в цепях воздушных линий 110 кВ и ремонтной перемычкой с двумя разъединителями со стороны линий. Для обеспечения транзита воздушные линии 110 кВ соединены между собой через секционный масляный выключатель 110 кВ (выключатель мостика) и секционные разъединители (рис. 2).

КРУН 10 кВ выполнено по схеме с одной одиночной, секционированной выключателем, системой сборных шин. Питание первой секции шин 10 кВ осуществляется от трансформатора Т1, питание второй секции – от трансформатора Т2 через вводные масляные выключатели. Большинство высоковольтных выключателей отходящих линий 10 кВ также имеют масляную изоляционную среду (рис. 2).

Анализ схемы подстанции показывает, что большая часть оборудования ОРУ 110 кВ и КРУН 10 кВ выработала свой ресурс, нуждается в комплексной модернизации и повышении уровня автоматизации управления оборудованием с применением интеллектуальных систем управления режимами работы оборудования и вторичных систем в соответствии с требованиями стандартов серии МЭК 61850 [7].

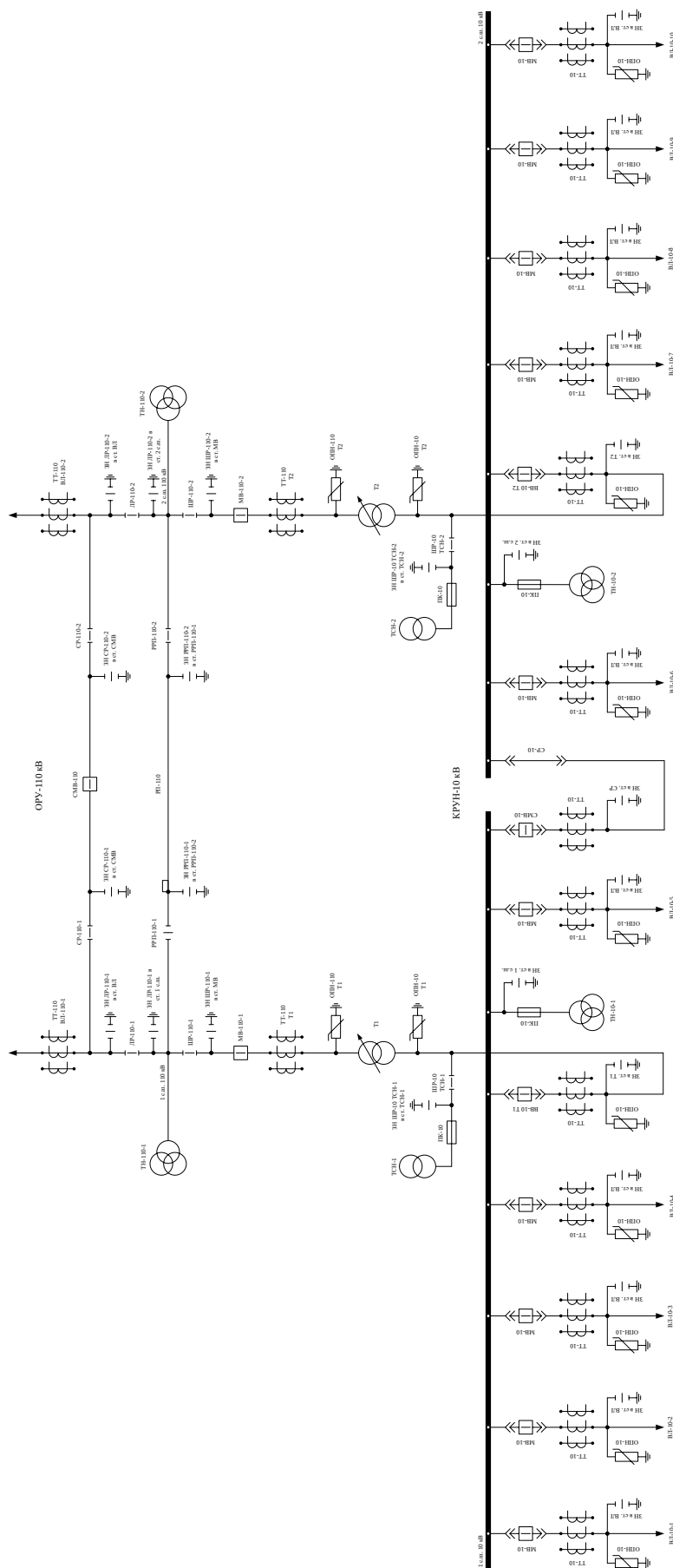


Рис. 2. Однолинейная схема электрических соединений подстанции



Результаты (Results)

В настоящее время во многих сетевых компаниях есть большой опыт построения систем АСУ ТП с применением стандарта МЭК 61850-8-1 на подстанционном уровне. Чего нельзя сказать об уровне процесса и присоединения [8, 9].

Одним из проблемных аспектов построения схем цифровых подстанций является то, что отечественной промышленностью в настоящее время цифровые (интеллектуальные) высоковольтные выключатели не выпускаются и находятся на стадии разработки, а стоимость цифровых измерительных трансформаторов на сегодняшний момент на порядок выше стоимости традиционных электромагнитных. Поэтому на уровне процесса цифровой подстанции более рациональным является формирование цифрового интерфейса коммутационных аппаратов и измерительных трансформаторов тока и напряжения с устройством сопряжения с объектом (преобразователи аналоговых сигналов (ПАС), преобразователи дискретных сигналов (ПДС)). Исходя из схемы ОРУ 110 кВ подстанции для исключения отказа работоспособности функций ПАС и ПДС выполняется резервирование данных устройств. Для ячеек КРУН 10 кВ в целях оптимизации возможна установка комбинированного устройства, совмещающего в себе функции ПАС и ПДС (ПАДС). Преимуществами передачи аналоговых и дискретных сигналов в цифровом виде являются: сокращение числа линий связи внутри ячеек и между ячейками, повышение электромагнитной совместимости устройств, благодаря применению оптоволоконных оптических линий связи. Во время передачи цифрового сигнала, а также во время его обработки во вторичном оборудовании не добавляется никаких дополнительных погрешностей. Этим обеспечивается соответствие требованиям, как по релейной защите, так и по измерениям [7-9].

Цифровыми решениями, применяемыми на уровне присоединения, является использование интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) – микропроцессорных терминалов РЗА, в которых реализована поддержка протоколов обмена по стандарту МЭК 61850. Основная функция данных устройств связана с реализацией функций по защите и автоматике присоединения. Дополнительные функции связаны с выполнением функций контроллера присоединения. Связь между устройствами РЗА осуществляется по протоколу МЭК 61850-8-1, посредством обмена GOOSE-сообщениями. Для этих целей в терминале РЗА выделены два порта с поддержкой протокола PRP, по которым идёт обмен GOOSE-сообщениями для передачи дискретных сигналов контроля и управления оборудованием. По этим же портам идет обмен GOOSE-сообщениями с преобразователями дискретных сигналов (ПДС). Связь между преобразователями аналоговых сигналов (ПАС) и терминалами РЗА для передачи SV-поток организована по протоколу МЭК 61850-9-2 через два других порта, также с использованием протокола резервирования PRP. Протокол PRP использует бесшовное (дублированное) резервирование, благодаря чему информация передаётся одновременно в каждую из подсетей, обеспечивая надёжность передачи данных. Также для синхронизации времени применяется протокол точного времени PTP. Применение данного протокола позволяет устройствам, подключённым к шине процесса в режиме реального времени производить мониторинг состояния энергосистемы и оперативно фиксировать возникновение аварийных ситуаций. Предлагаемая структурная схема реализуемой цифровой подстанции в результате модернизации представлена на рис. 3.

Выводы (Conclusion)

В результате, реализация предложенных цифровых технологий и решений на действующих подстанциях энергосистемы Белгородской области обеспечит:

- сокращение суммарной длины электрических кабелей и вторичных цепей;
- повышение уровня управляемости и наблюдаемости;



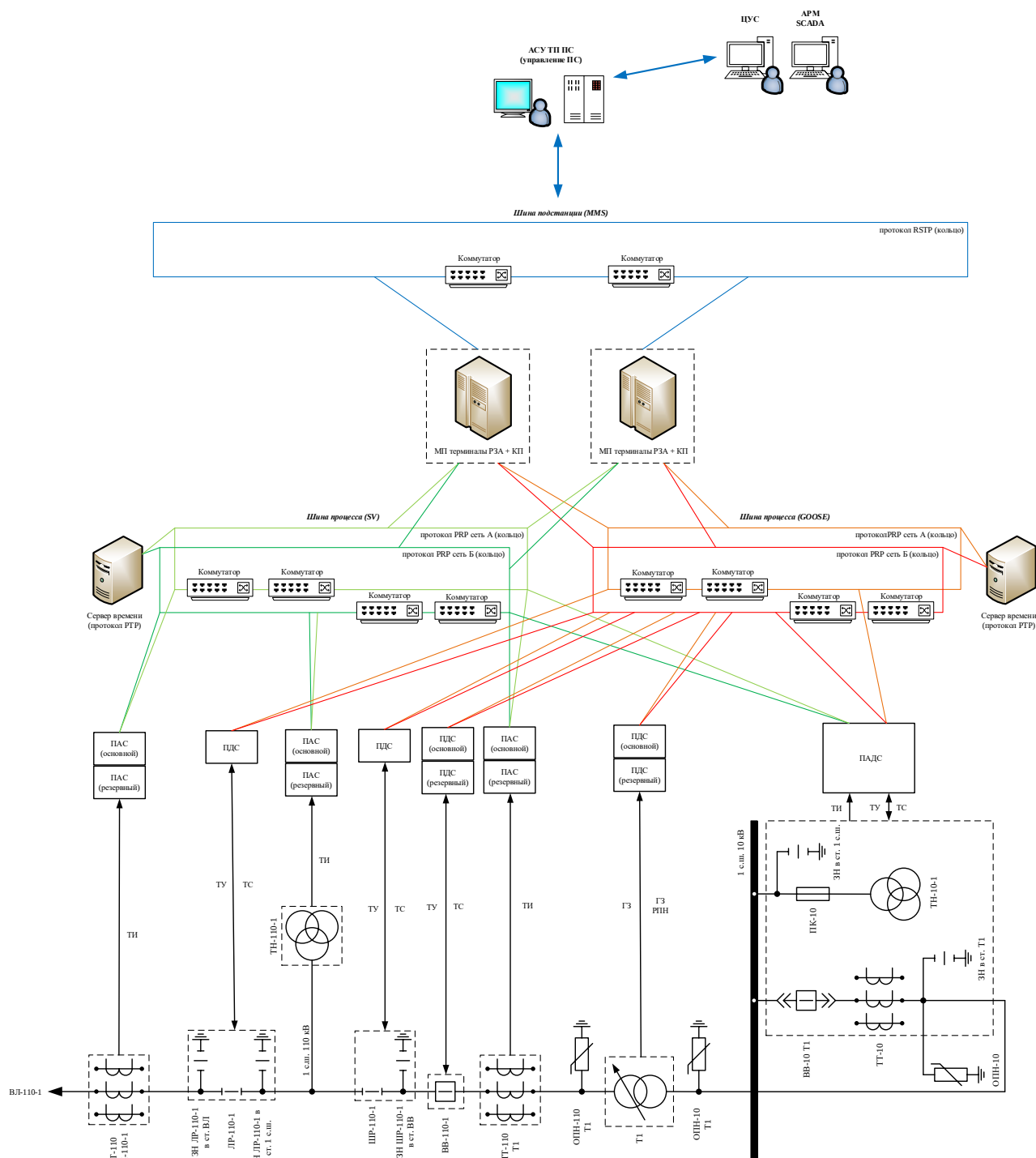


Рис. 3. Концептуальная структурная схема цифровой подстанции

– уменьшение затрат на мониторинг и самодиагностику вторичных связей;
 – поднятие уровня интеллектуального управления режимом работы силового оборудования и вторичных систем.

При этом предложенная концепция модернизации учитывает существующий уровень отечественной энергетической промышленности; позволяет применять электрооборудование, терминалы связи и обработки данных только отечественного производства, а также учитывает состоянием электрических сетей региона.



Предложенная концепция модернизации подстанций в энергосистеме Белгородской области с применением цифровых технологий и решений должна обеспечить поэтапную модернизацию действующих подстанций в направлении их цифровизации.

Информация о финансировании (Acknowledgments)

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Библиографический список

1. Майоров А.В. Развитие системы оперативно-технологического управления электросетевым комплексом в рамках концепции цифровой трансформации 2030 // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S2 (13). – С. 2-7. EDN: [HMDFRL](#)
2. Майоров А.В. Технические решения для повышения надежности эксплуатации распределительных электрических сетей в рамках цифровой трансформации // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2019. – № S3 (14). – С. 2-6. EDN: [RTGWFR](#)
3. Шилова Л.А., Адамцевич А.О. Интеграция цифровых технологий как ключевой фактор развития Российской энергетики // Энергетическая политика. – 2020. – № 9 (151). – С. 60-73. DOI: [10.46920/2409-5516_2020_9151_60](#). EDN: [PCLTXC](#)
4. Саенко А.А. Анализ, обоснование и выбор архитектуры цифровой подстанции // В сб.: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. Сб. докл. Национальной конф. с межд. участием. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2022. – С. 522-527. EDN: [FNOXXS](#)
5. Зацепина В.И., Кудрявцев А.Е. Основы построения цифровой подстанции // В сб.: Актуальные вопросы тепло- и электроэнергетики. Мат-лы Всеросс. научно-техн. конф. с межд. участием. – Грозный: РПК «Спектр»; ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 2021. – С. 78-82. EDN: [PEYPIE](#)
6. Основы построения цифровых подстанций в рамках концепции «Цифровая трансформация 2030» / Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, М.И. Хакимьянов, Р.Т. Хазиева // В сб.: Всероссийский педагогический форум. Сб. ст. II Всеросс. научно-метод. конф. – Петрозаводск: МЦНП «Новая Наука», 2020. – С. 348-360. DOI: [10.46916/20112020-1-978-5-00174-039-1](#). EDN: [BYQHRN](#)
7. Цифровизация энергообъектов: задачи и их решения / Е.С. Воробьев, В.А. Наумов, В.И. Антонов и др. // В сб.: Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности. Мат-лы III Межд. научно-техн. конф. – Чебоксары: ЧГУ, 2019. – С. 267-272. EDN: [EXJGYA](#)
8. Гаврилов Ф.В. Основные преимущества и недостатки цифровой электрической подстанции // Теория и практика современной науки. – 2018. – № 6 (36). – С. 169-173. EDN: [YAVMIH](#)
9. Лоскутов А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 1. – С. 9-27. DOI: [10.46960/2658-6754_2018_1_9](#). EDN: [YOYWMH](#)

References

1. Mayorov, A. V. (2019). Razvitie sistemy` operativno-texnologicheskogo upravleniya e`lektrosetevy`m kompleksom v ramkax koncepcii cifrovoj transformacii 2030 [Development of an operational and technological management system for the electric grid complex within the framework of the concept of digital transformation 2030]. *E`lektroe`nergiya. Peredacha i raspredelenie*, S2 (13), 2-7. [In Russian]
2. Mayorov, A. V. (2019). Texnicheskie resheniya dlya povы`sheniya nadezhnosti e`kspluatatsii raspredelitel`ny`x e`lektricheskix setej v ramkax cifrovoj transformacii // *E`lektroe`nergiya. Peredacha*



- i raspredelenie. – 2019. – № S3 (14). – S. 2-6. EDN: RTGWFR [Technical solutions to improve the reliability of operation of electrical distribution networks as part of digital transformation]. *E'lektroe'nergiya. Peredacha i raspredelenie, S3 (14), 2-6*. [In Russian]
3. Shilova, L. A., & Adamtsevich, A. O. (2020). Integraciya cifrovyy'x tekhnologij kak klyuchevoj faktor razvitiya Rossijskoj e'nergetiki [Integration of digital technologies as a key factor in the development of Russian energy]. *E'nergeticheskaya politika, 9(151), 60-73*. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_9151_60 [In Russian]
 4. Saenko, A. A. (2022). Analiz, obosnovanie i vy'bor arxitektury` cifrovoj podstancii [Analysis, justification and selection of digital substation architecture] In *Proc. of Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molody'x ucheny'x BGTU im. V.G. Shuxova* (pp. 522-527). Izd-vo BGTU [In Russian]
 5. Zatsepina, V. I., & Kudryavtsev, A. E. (2021). Osnovy` postroeniya cifrovoj podstancii [Basics of building a digital substation]. In *Proc. of Aktual'ny'e voprosy` teplo- i e'lektroe'nergetiki* (pp. 78-82). RPK «Spektr»; GGNTU im. akad. M.D. Millionshnikova. [In Russian]
 6. Andrianova, L. P., Pavlova, Z. X., Hakimyanov, M. I., & Hazieva, R. T. (2020). "Osnovy` postroeniya cifrovyy'x podstancij v ramkax koncepcii «Cifrovaya transformaciya 2030»" [Basics of building digital substations within the framework of the "Digital Transformation 2030" concept]. In *Proc. of All-Russian Pedagogical Forum* (pp. 348-360). ICSP "New Science". <https://doi.org/10.46916/20112020-1-978-5-00174-039-1> [In Russian]
 7. Vorobyov, E. S., Naumov, V. A., Antonov, V. I., Soldatov, A. V., & Mitin, D. A. (2019). Cifrovizaciya e'nergoob`ektov: zadachi i ix resheniya [Digitalization of energy facilities: challenges and their solutions]. In *Proc. of Problemy` i perspektivy` razvitiya e'nergetiki, e'lektrotexniki i e'nergoeffektivnosti* (pp. 267-272). ChGU. [In Russian]
 8. Gavrillov, F. V. (2018). Osnovny'e preimushhestva i nedostatki cifrovoj e'lektricheskoy podstancii [Main advantages and disadvantages of digital electrical substation]. *Teoriya i praktika sovremennoj nauki, 6 (36), 169-173*. [In Russian]
 9. Loskutov, A. B. (2018). Problemy` perexoda e'lektroe'nergetiki na cifrovyy'e tekhnologii [Problems of transition of the electric power industry to digital technologies]. *Intellektual'naya e'lektrotexnika, 1, 9-27*. https://doi.org/10.46960/2658-6754_2018_1_9 [In Russian]

Сведения об авторах

Прасол Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и автоматика», БГТУ им. В.Г. Шухова, e-mail: dapras@mail.ru, ORCID [0000-0003-4369-8173](https://orcid.org/0000-0003-4369-8173).

Саенко Андрей Александрович, инженер по релейной защите и автоматике, служба релейной защиты, автоматике, измерений и метрологии, Филиал ПАО «Россети Центр» – «Белгородэнерго», e-mail: mr.andrey.sa@mail.ru.

Authors about

Dmitriy Prasol, Cand. of Tech. Sciences, department «Electric power and automation», BSTU named after V.G. Shukhov, e-mail: dapras@mail.ru, ORCID [0000-0003-4369-8173](https://orcid.org/0000-0003-4369-8173).

Andrey Saenko, relay protection and automation engineer, relay protection, automation, measurement and metrology service, Branch of Public Joint stock company «Rosseti Centre» - «Belgorodenergo», e-mail: mr.andrey.sa@mail.ru



ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Романов Л.Р., Погодина С.А., Крюков О.В.

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Аннотация

Представлен комплексный анализ данных технического учета функционирования электротехнических комплексов релейной защиты в единой национальной электроэнергетической сети России, благодаря чему установлены основные типы, причины и закономерности неправильной и аварийной работы всего спектра защит. Предложен подход к потенциальному переходу на обслуживание промышленных объектов электроэнергетики на базе использования всей совокупности функциональных возможностей релейной защиты для решения проблем автоматизации процедур обслуживания на новой аппаратной и методологической базе. Сформулированы оптимальные критерии оценки работоспособности электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых трансформаторных подстанций, позволяющие дополнительно учесть влияние полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования, влияющей на качество работы защит. Показано, что организация технического обслуживания электрооборудования средствами релейной защиты и автоматики по фактическому состоянию на энергетическом объекте с развитой системой автоматизированного сбора и обработки информации является закономерным шагом преобразований в электроэнергетике. Анализ актуальности действующей технологии технического обслуживания и ремонта электрооборудования показал существенное снижение воздействий на функциональные группы измерения, информационной среды и приемных модулей электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых подстанций.

Ключевые слова: цифровая подстанция, распределительное устройство, релейная защита и автоматика, диагностирующее устройство, поток отказов, техническое обслуживание, электротехнический комплекс.

FUNCTIONAL CAPABILITIES OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION SYSTEMS OF DIGITAL SUBSTATIONS

Leonid Romanov, Svetlana Pogodina, Oleg Kryukov

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

Abstract

A comprehensive analysis of the data on the technical accounting of the functioning of electrical relay protection complexes in the unified national electric power grid of Russia is presented, thanks to which the main types, causes and patterns of incorrect and emergency operation of the entire range of protections are established. An approach to the potential transition to servicing industrial electric power facilities based on the use of the entire set of relay protection functionality to solve the problems of automating maintenance procedures on a new hardware and methodological basis is proposed. Optimal criteria for evaluating the operability of electrical relay protection complexes and automation of digital transformer substations are formulated, which additionally take into account the influence of completeness and reliability of electrical information on the condition of protected electrical equipment affecting the quality of protection. It is shown that the organization of maintenance of electrical equipment by means of relay protection and automation according to the actual condition at an energy facility with a developed system of automated information collection



and processing is a natural step of transformation in the electric power industry. The analysis of the relevance of the current technology of maintenance and repair of electrical equipment showed a significant reduction in the impact on the functional groups of measurement, information environment and receiving modules of electrical relay protection complexes and automation of digital substations.

Keywords: digital substation, switchgear, relay protection and automation, diagnostic device, failure rate, maintenance, electrical complex.

Введение

В настоящее время основным типом технического обслуживания (ТО) комплексов релейной защиты и автоматики (РЗА) электротехнических комплексов (ЭТК) остается традиционное планово-предупредительное ТО, при котором все типы РЗА и вторичное оборудование с заранее установленной нормативной периодичностью подвергаются стандартным процедурам осмотра и ремонта [1, 2]. В то же время, согласно данным [3, 4], основное влияние на работоспособность и качество функционирования ЭТК РЗА оказывает непосредственно человеческий фактор. Именно поэтому сегодня продолжают научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию универсальных автоматизированных процедур ТО по фактическому состоянию оборудования ЭТК РЗА, минимизирующие участие персонала [5, 6]. В этой связи актуальной задачей является оценка потенциала функциональных возможностей ЭТК РЗА для решения проблем автоматизации процедур ТО на новой аппаратной и методологической базе.

Материалы и методы

С 2020 года в Правила организации ТО и ремонта объектов электроэнергетики внесены изменения в части организации ТО ЭТК РЗА, одним из принципиальных концептов в которых стало закрепление ТО по состоянию [7, 8]. Согласно правилам [7], ТО по состоянию может применяться как для новых, так и для введенных в работу ЭТК РЗА, удовлетворяющих ряду условий. В частности, ЭТК РЗА должны быть размещены в помещениях с нормальными эксплуатационными условиями и срок их службы не должен быть превышен. Кроме эксплуатационных условий, для новых ЭТК РЗА должно быть выполнено ТО вида «Н» и «К1» («К» или «В» для комплексов, уже находящихся в эксплуатации). Одним из ключевых условий организации ТО по состоянию является сбор и анализ электротехнической информации с ЭТК РЗА [9-11]. Автоматизированный сбор информации осуществляется с отдельного АРМ РЗА (рис. 1) через подключение ЭТК РЗА к системе объекта электроэнергетики, позволяющей получить полный объем измерений и передачу информации [12, 13].

При организации ТО по состоянию для каждого ЭТК РЗА обязателен регулярный мониторинг функционирования, обеспечивающий оценку работоспособности [14, 15]. Для элементов и цепей ЭТК РЗА, не охватываемых самодиагностикой и мониторингом функционирования, предусматривается периодическое ТО. Независимо от выполнения мониторинга функционирования ЭТК РЗА, функционально связанное с ними вторичное оборудование, также должно обслуживаться.

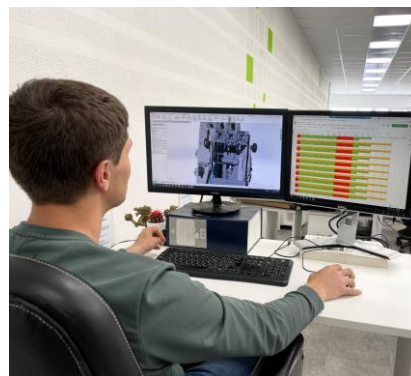


Рис. 1. Сбор и передача информации с отдельного удаленного АРМ РЗА

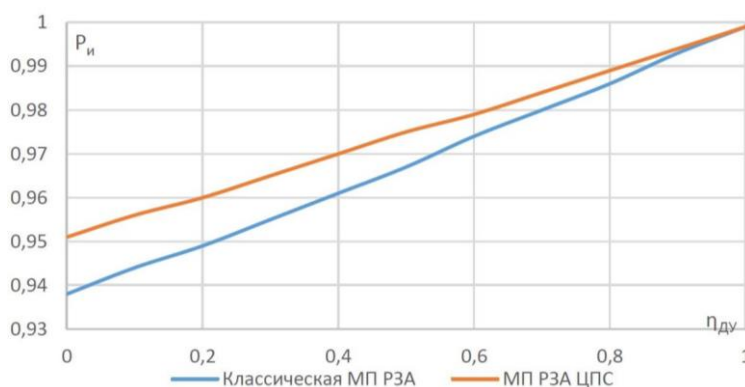
Таким образом, основой для перехода на ТО по состоянию является развитая система сбора и передачи информации, которую можно считать одним из компонентов диагностирующего устройства (ДУ). На основе математической модели надежности определим изменение вероятности безотказной работы ЭТК РЗА при изменении коэффициента эффективности диагностики ЭТК РЗА $\eta_{\text{ДУ}}$ в диапазоне от 0 (диагностирование отсутствует) до 1 (диагностируются любые возникающие неисправности). Разницу между исправными состояниями ЭТК РЗА для классической $P_{\text{К1}}$ и цифровой $P_{\text{Ц1}}$ подстанциями обозначим как $\Delta P_{\text{И}} = |P_{\text{К1}} - P_{\text{Ц1}}|$.

Результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Исправность комплексов РЗА при разной эффективности ДУ

$\eta_{\text{ДУ}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$P_{\text{К1}}$	0,938	0,944	0,949	0,955	0,961	0,967	0,974	0,980	0,986	0,993	0,999
$P_{\text{Ц1}}$	0,951	0,956	0,960	0,965	0,970	0,975	0,979	0,984	0,989	0,994	0,999
$\Delta P_{\text{И}}$	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,005	0,004	0,003	0,001	0

**Рис. 2. Влияние эффективности ДУ на исправность комплексов РЗА**

Результаты

Результаты расчета показали, что влияние эффективности ДУ на вероятность исправного состояния ЭТК РЗА имеет практически линейную зависимость. При повышении эффективности ДУ различие исправного состояния РЗА цифровых подстанций (ЦПС) и классической (МП) РЗА $\Delta P_{\text{И}}$ уменьшается и стремится к 0 при $\eta_{\text{ДУ}} = 1$.

Переход на ТО по состоянию приведет к снижению интенсивности восстановлений на величину $1/T_{\text{пер}}$, где $T_{\text{пер}}$ – период между проверками исправности защиты. Необходимо оценить, удастся ли компенсировать снижение интенсивности восстановлений при исключении плановых проверок за счет повышения эффективности ДУ. На основе математической модели рассчитано влияние изменения $T_{\text{пер}}$ в диапазоне от $t \rightarrow 0$ до $t = T_{\text{пред}}$, где $T_{\text{пред}}$ – предполагаемый срок службы ЭТК РЗА. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Обсуждение

По результатам расчетов видно, что при $\eta_{\text{ДУ}} = 0,5$ функция вероятности исправного состояния ЭТК РЗА принимает установившееся значение при $T_{\text{пер}} = 4$. При увеличении $\eta_{\text{ДУ}}$ до 0,7 и 0,9 данная функция принимает установившиеся значения при межремонтном интервале 2 и 0,5 года соответственно. Таким образом, при переходе на ТО по состоянию исправность ЭТК РЗА может быть обеспечена повышением эффективности ДУ, эквивалентным снижению интенсивности плановых восстановлений.



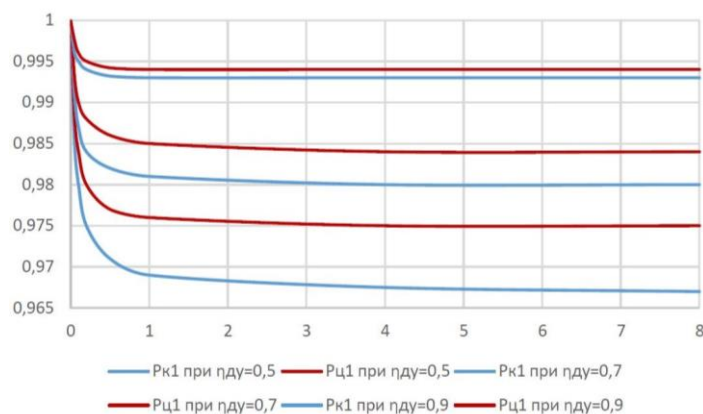


Рис. 3. Влияние межремонтного интервала на исправность защит

Организация ТО ЭТК РЗА по состоянию на энергетическом объекте с развитой системой автоматизированного сбора и обработки информации является закономерным шагом преобразований в электроэнергетике. Для современного ЭТК РЗА, размещенного в нормальных эксплуатационных условиях, регулярно отправляющего сведения о своем состоянии и прошедшего ТО вида «Н» и «К1» маловероятно возникновение неисправности, которая не обнаруживается встроенным ДУ и способна привести к неправильной работе. Возможность возникновения такого события существенно меньше вероятности ошибки персонала при выполнении планового ТО.

Анализ актуальности действующей технологии ТО показал, существенное снижение воздействий на функциональные группы измерения, информационной среды и приемных модулей электротехнических комплексов РЗА ЦПС. Воздействия на группы аппаратной, программной части и системы телеметрии остались на сопоставимом уровне.

Выводы

1. Определена возможность обеспечения за счет повышения эффективности ДУ высоких значений работоспособности и качества функционирования ЭТК РЗА ЦПС при снижении интенсивности восстановлений в результате отказа от планового ТО и перехода на ТО по состоянию.

2. Выполнен анализ актуальности утвержденных объемов ТО для обеспечения работоспособности и качества функционирования ЭТК РЗА ЦПС, а также определен способ учета влияния полноты ТО на качество функционирования РЗА ЦПС и сформирован перечень параметров, учет которых необходим при организации ТО по фактическому состоянию комплексов РЗА ЦПС.

Библиографический список

1. Структуры и направления развития электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики / В.А. Ипполитов, С.А. Погодина, Л.Р. Романов и др. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 7(167). – С. 38-46. EDN: [CZWWQA](#)
2. Крюков О.В. Особенности релейной защиты и автоматики вдольтрассовых линий электропередачи // Электричество. – 2018. – № 11. – С. 4-9. DOI: [10.24160/0013-5380-2018-11-4-9](#). EDN: [YMHWEH](#)
3. Крупин С.Н., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Принципы организации релейной защиты и автоматики вдольтрассовых ЛЭП магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2013. – №12. – С. 70-74. EDN: [RSDMCR](#)
4. Воронков В.И., Рубцова И.Е. Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2010. – № 3(643). – С. 32-37. EDN: [LABTYI](#)



5. Мещеряков В.Н., Крюков О.В., Туганов Р.Б. Применение методов искусственного интеллекта для управления и мониторинга электромеханических систем и электроприводов // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 3(128). – С. 10-16. EDN: [IQYKDV](#)
6. Многоуровневый подход к анализу отказоустойчивости средствами резервирования, релейной защиты и автоматики электроснабжения / А.В. Саушев, М.И. Еразумов, Л.Р. Романов, О.В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 4(165). – С. 34-43. EDN: [GFDQRP](#)
7. Пужайло А.Ф., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2. – С. 98-106. EDN: [QABTPD](#)
8. Степанов С.Е. Организация диспетчерского управления подстанциями компрессорных цехов с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 27-34. DOI: [10.34831/EP.2020.78.93.004](#). EDN: [ZKWIFW](#)
9. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. – 2017. – № 8(756). – С. 84-89. EDN: [ZEMTXL](#)
10. Васенин А.Б., Крюков О.В. Вопросы электропитания вдольтрассовых объектов Единой системы газоснабжения России // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2020. – № 2(44). – С. 181-192. EDN: [YDYUSG](#)
11. Мониторинг и новые функциональные возможности распределительных устройств трансформаторных подстанций с НКУ «КАСКАД» / В.А. Ипполитов, А.Б. Кононенко, А.А. Косоротов, Крюков О.В. // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 5(275). – С. 32-39. DOI: [10.14489/td.2021.05.pp.032-039](#). EDN: [BVMVLG](#)
12. Разработка прикладного программного обеспечения для системы геотехнического мониторинга газопроводов / И.В. Гуляев, С.Е. Степанов, А.Б. Васенин и др. // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 6 (288). – С. 48-59. DOI: [10.14489/td.2022.06.pp.048-059](#). EDN: [IKSIGQ](#)
13. Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем автоматическим регулированием / А.Б. Васенин, С.Е. Степанов, А.А. Иванов и др. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 5(166). – С. 16-25. EDN: [IITOUS](#)
14. Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 12(137). – С. 18-23. EDN: [CGFCTV](#)
15. Шарыгин М.В., Романов Л.Р., Крюков О.В. Совершенствование токовых защит реклоузеров в распределительных сетях 6-35 кВ // В сб.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2023. – С. 336-339. EDN: [BANHNR](#)

References

1. Ippolitov, V. A., Gorokhova N. B., Gruzdev, V. V., Pogodina, S. A., Romanov, L. R., & Kryukov O. V. (2023). Structures and directions development of electrical relay protection complexes and automatics. *Avtomatizaciya i IT v e`nergetike*, (167), 38-46. [In Russian]
2. Kryukov, O. V. (2018). Specific features of relay protection and automatic controls of a power line laid along the pipeline route. *E`lektrichestvo*, 11, 4-9. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-11-4-9> [In Russian]
3. Krupin, S. N., Kryukov, O. V., & Rubtsova, I. E (2013). Principy` organizacii relejnoj zashhity` i avtomatiki vdol`trassovy`x LE`P magistral`ny`x gazoprovodov [Principles of the organization of relay protection and automation of long-distance transmission lines of main gas pipelines]. *Gazovaya promy`shlennost`*, 12, 70-74. [In Russian]
4. Voronkov, V. I., & Rubtsova, I. E. (2010). E`lektrosnabzhenie i e`lektooborudovanie linejny`x potrebitelej magistral`ny`x gazoprovodov [Power supply and electrical equipment of linear consumers of main gas pipelines]. *Gazovaya promy`shlennost`*, 3(643), 32-37. [In Russian]



5. Meshcheryakov, V. N., Kryukov, O. V., & Tuganov, R. B. (2020). Application of artificial methods intelligence for management and monitoring electromechanical systems and electric drives. *Avtomatizatsiya i IT v e'nergetike*, 3(128), 10-16. [In Russian]
6. Saushev, A. V., Erazumov, M. I., Romanov, L. R., & Kryukov O. V. (2023). Multilevel approach to analysis fault safety by means reservation, relay protection and power supply automation. *Avtomatizatsiya i IT v e'nergetike*, 4 (165), 34-43. [In Russian]
7. Puzhailo, A. F., & Rubtsova, I. E. (2012). E'nergoberezhenie v agregatax kompressorny'x stancij sredstvami chastotno-reguliruemogo e'lektroprivoda [Energy saving in compressor station units by means of a frequency-controlled electric drive]. *Nauka i tekhnika v gazovoj promy'shlennosti*, 2, 98-106. [In Russian]
8. Stepanov, S. E. (2021). Organizatsiya dispetcherskogo upravleniya podstanciyami kompressorny'x cexov s e'kspertnoj ocenкой proektny'x reshenij [Organization of dispatching control of substations of compressor shops with expert assessment of design solutions]. *Promy'shlennaya e'nergetika*, 1, 27-34. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.78.93.004> [In Russian]
9. Kryukov, O. V., Stepanov, S. E., & Serebryakov, A. V. (2017). Modern approach to the organization of repair according to the technical condition forecast and the resource of electrical equipment. *Gazovaya promy'shlennost*, 8(756), 84-89. [In Russian]
10. Vasenin, A. B., & Kryukov O. V. (2020). Issues of electricity supply for route facilities of the unified gas supply system of Russia. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauk*, 2(44), 181-192. [In Russian]
11. Ippolitov, V. A., Kononenko, A. B., Kosorotov, A. A., & Kryukov O. V. (2021). Monitoring and new functionality of switchgears of transformer substations with LCD "Cascade". *Kontrol'. Diagnostika*, 24(5), pp. 32-39. <https://doi.org/10.14489/td.2021.05.pp.032-039> [In Russian]
12. Gulyaev, I. V., Stepanov, S. E., Vasenin, A. B., Kosorotov, A. A., & Kryukov O. V. (2022). Application software development for the geotechnical monitoring system of gas pipelines. *Kontrol'. Diagnostika*, 25(6), 48-59. <https://doi.org/10.14489/td.2022.06.pp.048-059> [In Russian]
13. Vasenin, A. B., Stepanov, S. E., Ivanov, A. A., Podshivalov, E. S., & Kryukov O. V. (2023). Ensuring stability of electric power systems by automatic regulation excitations. *Avtomatizatsiya i IT v e'nergetike*, 5(166), 16-25. [In Russian]
14. Kononenko, A. B., Kosorotov A. A., & Kryukov O. V. (2020). Expansion of functional automation opportunities and monitoring of distribution devices KTP "Kaskad". *Avtomatizatsiya i IT v e'nergetike*, 12, 26-31. [In Russian]
15. Sharygin, M. V., Romanov, L. R. & Kryukov O. V. (2023). Sovershenstvovanie tokovy'x zashhit reklozuerov v raspredelitel'ny'x setyax 6-35 kV [Improvement of current protection of reclosers in 6-35 kV distribution networks]. In *Porc of. Sostoyanie i perspektivy' razvitiya e'lektro- i teplotexnologii (XXII Benardosovskie chteniya)* (pp. 336-339). ISEU. [In Russian]

Сведения об авторах

Романов Леонид Романович, аспирант, технико-коммерческий отдел, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Погодина Светлана Александровна, главный инженер проектов Инженерного центра, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Крюков Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, заместитель директора по науке, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Authors about

Leonid Romanov, graduate student, Technical and Commercial Department of TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod.

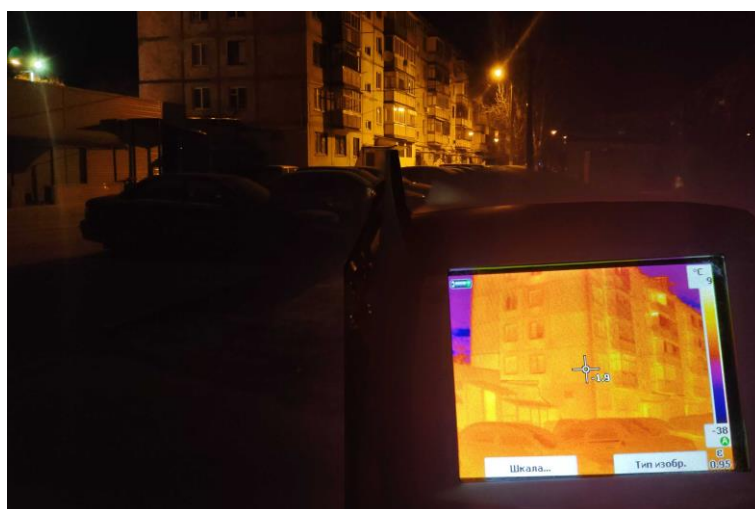
Svetlana Pogodina, Chief Engineer of the Engineering Center projects of TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod.

Oleg Kryukov, Dr. of Tech. Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science of TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY



О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ TEWI, LCCP И LCC ДЛЯ СРАВНЕНИЯ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩИХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ

Карнаух В.В.^{1, 2}, Байда Б.Ю.¹, Приймак А.С.¹

ДОННУЭТ, г. Донецк, ДНР, ² СамГТУ, г. Самара

Аннотация

В работе рассматриваются критерии, оценивающие техногенное воздействие энергопреобразующих холодильных систем на окружающую среду. Приводятся результаты сравнительного анализа по TEWI и LCCP, полученные для среднетемпературной парокомпрессионной теплонасосной установки (ПТНУ), работающей на хладагентах R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744. Из рассматриваемых альтернативных рабочих тел наихудшие экологические показатели у R1336mzz (E), т.к. суммарная эмиссия эквивалентного CO₂ за весь период жизненного цикла превышает аналогичный показатель для R600a в 4,2 раза. Результаты LCCP показывают, что производительность системы и выбросы при производстве оборудования являются доминирующими факторами выбросов CO₂ в течение всего срока службы ПТНУ. Результаты сравнения хладагентов на основе TEWI и LCCP прямо пропорционально и зависят от величины потребляемой энергии со стороны ПТНУ, что также отражается на показателях энергоэффективности системы. Критерии TEWI, LCCP и LCC целесообразно учитывать при сравнении и подборе энергопреобразующих холодильных систем, применяя метод многокритериальной оптимизации, что поможет пользователю получить более информативное представление о ПТНУ.

Ключевые слова: энергопреобразующая система, холодильная техника, тепловой насос, LCCP, TEWI, LCC.

TEWI, LCCP AND LCC METRICS FOR COMPARING THE REFRIGERATION SYSTEMS

Viktoriia Karnaukh^{1, 2}, Boris Bayda¹, Alexey Priymak¹

¹Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, Donetsk

²Samara State Technical University, Samara

Abstract

The paper considers environmental metrics that assess the man-made impact of energy-converting refrigeration systems on the environment. The results of a comparative analysis of TEWI and LCCP obtained for a medium-temperature vapor-compression heat pump unit (VCHP) operating on refrigerants R1234ze, R1336mzz (E), R600a and R744 are presented. R1336mzz (E) has the worst environmental indicators, because the total emission of equivalent CO₂ for the entire period of the life cycle exceeds the same indicator for R600a by 4.2 times. The LCCP results show that system performance and equipment manufacturing emissions are the dominant drivers of CO₂ emissions over the life of the SHP unit. The results of comparing refrigerants based on TEWI and LCCP are directly proportional and depend on the amount of energy consumed by the VCHP, which is also reflected in the energy efficiency indicators of the system. It is advisable to take into account the TEWI, LCCP and LCC criteria when comparing and selecting energy-converting refrigeration systems using the multi-criteria optimization method, which will help the user get a more informative understanding of the VCHP.

Keywords: energy conversion system, refrigeration, heat pump, LCCP, TEWI, LCC.



Введение

В последние годы для количественной оценки техногенного воздействия на окружающую среду энергопреобразующих холодильных систем используют ряд критериев: потенциал глобального потепления ПГП (англ. *Global Warming Potential – GWP*), потенциал разрушения озонового слоя (англ. *Ozone Depletion Potential – ODP*), полный эквивалентный вклад в парниковый эффект (англ. *Total Equivalent Warming Impact – TEWI*) и показатель «влияние на климат за жизненный цикл» (англ. *Life Cycle Climate Performance – LCCP*) [1-4].

Несмотря на непрекращающиеся дебаты по их целесообразности и достоверности, большинство специалистов рассматривает их в качестве важного инструмента для подбора, разработки и внедрения холодильного оборудования. Хотя каждый из показателей служит одной и той же цели – количественной оценки воздействия хладагентов на глобальное потепление, их использование может привести к разным выводам. Поэтому для корректного проектирования, эксплуатации и прогнозирования работы парокомпрессионных систем неотъемлемым этапом должна быть оценка ее влияния на климат за весь срок эксплуатации.

Цель данной работы – краткий обзор экологических критериев и их сравнительная оценка на примере энергопреобразующей системы – среднетемпературной парокомпрессионной теплонасосной установки, работающей на хладагентах R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744.

Материалы и методы

Потенциал глобального потепления ПГП – это теплота, поглощаемая любым парниковым газом в атмосфере, кратная количеству теплоты, которое может быть поглощено той же массой диоксида углерода (CO_2). Для CO_2 GWP равен 1. Для других газов это зависит от газа и временных рамок. Имеются справочные значения GWP , которые оцениваются и обновляются для каждого временного интервала по мере улучшения методов их расчета и прогнозирования.

Для количественной оценки всех негативных факторов, определяющих комплексный вклад хладагентов в глобальное потепление, был введен расчетный показатель экологической чистоты холодильной установки – фактор суммарного эквивалентного воздействия хладагента на глобальное потепление $TEWI$.

$TEWI$ является показателем для оценки парникового эффекта путем сочетания прямого вклада от выбросов хладагентов в атмосферу и косвенного вклада от выбросов углекислого газа и других газов, образующихся при выработке энергии, необходимой для работы холодильной системы в течение всего срока ее эксплуатации [4]:

$$TEWI = GWP \times m_{\text{х.а.}} \times L_{\text{год}} \times n + GWP \times m_{\text{х.а.}} \times (1 - \alpha_{\text{ут}}) + E_{\text{год}} \times \beta \times n, \quad (1)$$

где GWP – потенциал глобального потепления хладагента по отношению к CO_2 ($GWP_{\text{CO}_2}=1$), $\text{кгCO}_2/\text{кг}$; $m_{\text{х.а.}}$ – масса хладагента в установке, кг (из термодинамического расчета); $\alpha_{\text{ут}}$ – величина утилизации хладагента (эмиссия) из установки, от 0 до 1; $L_{\text{год}}$ – величина утечек хладагента в течение года, % (2-5% от заправки); n – средний срок работы установки, лет (мин 15 лет); β – коэффициент косвенных выбросов – масса выделяющегося при производстве 1 $\text{кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии диоксида углерода, $\text{кг}\cdot\text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ (0,165 $\text{кг}\cdot\text{CO}_2/\text{кВт}\cdot\text{ч}$); $E_{\text{год}}$ – годовое энергопотребление, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$.

Показатель $TEWI$ предназначен для расчета полного влияния процессов искусственного охлаждения на парниковый эффект. Этот показатель учитывает как прямое влияние на парниковый эффект хладагента, если имеет место его утечка, так и кос-



венное воздействие холодильной системы вследствие потребления ею энергии, используемой для энергоснабжения установки при ее нормальной работе в течение всего срока ее эксплуатации.

Прямые выбросы включают ежегодную утечку хладагента и утечки, вызванные катастрофами; косвенные выбросы связаны с жизненным циклом хладагента, с производством и транспортировкой системы и хладагента. Показатель *TEWI* более показателен, чем *GWP*, но он не принимает во внимание все сопутствующие косвенные выбросы. На практике расчет показателя *LCCP* («влияние на климат за жизненный цикл») сложнее, чем *TEWI*. Он предназначен для предоставления целостной картины воздействия установки на окружающую среду. *LCCP* рассчитывается как сумма прямых и косвенных эмиссий системы за весь период существования системы «от колыбели до могилы» [1].

Критерий *LCCP* определяется по следующим формулам:

$$LCCP = \text{прямое воздействие (DE)} + \text{косвенное воздействие (IE)}. \quad (2)$$

$$DE = m_{\text{х.а.}} (n \cdot L_{\text{год}} + EOL)(GWP + \text{adp.GWP}), \quad (3)$$

где $L_{\text{год}}$ – величина утечек хладагента в течение года, % от заправки (2-5 %); EOL – остаток хладагента на конец срока службы, % от заправки (принимается 15% от заправки); adp.GWP – адаптационный потенциал глобального потепления хладагента, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кг}$ (по табл. для R1234yz = 3,3; R600a = 1,7; R=1336mzz = 3,1).

$$IE = n \cdot E_{\text{год}} \cdot EM + \sum(m \cdot MM) + \sum(m_{\text{пм}} \cdot RM) + m_{\text{х.а.}} (1 + n \cdot L_{\text{год}}) \cdot RFM + m_{\text{х.а.}} \cdot (1 - EOL) \cdot RFD, \quad (4)$$

где EM – эмиссия CO_2 , приходящаяся на 1 кВт·ч энергии, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$; (0,54...0,86 $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$); m – масса установки, кг; MM – эмиссии CO_2 при производстве материалов, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кг}$; $m_{\text{пм}}$ – масса переработанного материала (вторсырья), кг; RM – эмиссии CO_2 при производстве вторсырья, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кг}$; RFM – эмиссии при производстве хладагента, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кг}$; RFD – эмиссии при уничтожении хладагента, $\text{кгCO}_{2\text{экв}}/\text{кг}$.

Методика определения *LCCP* – очень гибкий инструмент, применяемый к любому типу энергопреобразующих систем (стационарных холодильных систем, систем кондиционирования и тепловых насосов, использующих парокомпрессионный цикл и потребляющих электроэнергию из электросетей).

Один из важных потребительских критериев сложного наукоемкого изделия, к которому можно отнести и ПТНУ, – стоимость жизненного цикла – СЖЦ (англ. *Life Cycle Cost, LCC*) [5-7].

Важнейший принцип концепции СЖЦ определен как «прогноз и управление расходами на производство и эксплуатацию изделия на стадии его проектирования».

Расчет СЖЦ изделия позволяет определить затраты на:

- предварительное и концептуальное проектирование;
- разработку и проектирование системы;
- изготовление (себестоимость изделия);
- обслуживание и утилизацию.

Процессы жизненного цикла теплового насоса, которые учитывает методика СЖЦ, приведены на рис. 1. При таких расчетах часто используют параметры, полученные при анализе надежности технической системы и составляющих узлов и агрегатов: интенсивность отказов, стоимость запасных частей, продолжительность ремонта, стоимость комплектующих и т.д.



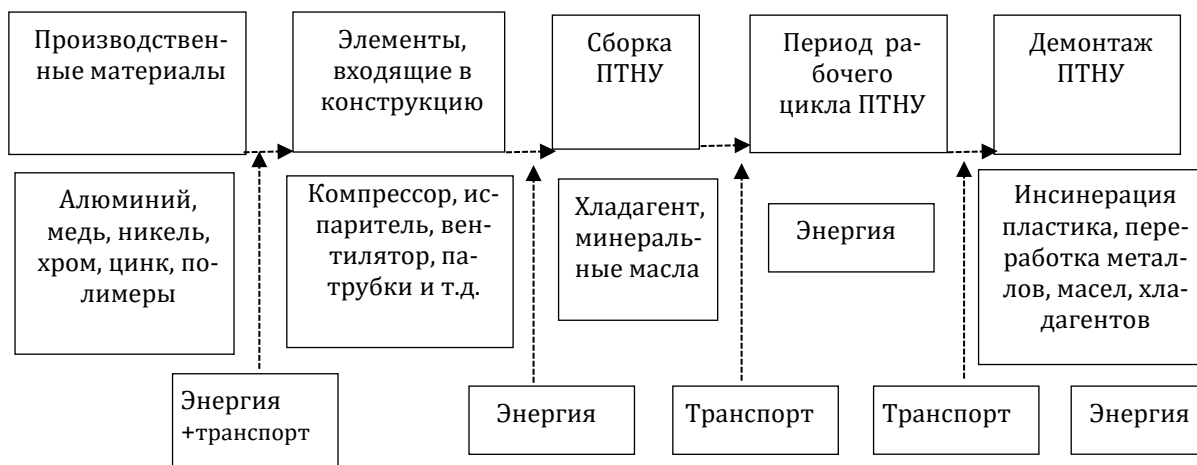


Рис. 1. Процессы жизненного цикла теплового насоса

В соответствие с методикой, предложенной в [8], СЖЦ для тепловых насосов определяется по формуле:

$$\text{СЖД} = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d, \quad (5)$$

где C_{ic} – первоначальные затраты, цена покупки (насос, система, труба, вспомогательные услуги); C_{in} – стоимость установки и ввода в эксплуатацию (включая обучение); C_e – затраты на электроэнергию (прогнозируемые затраты на эксплуатацию системы, включая привод насоса, элементы управления и любые вспомогательные услуги); C_o – эксплуатационные расходы (трудоzатраты на обычный надзор за системой); C_m – затраты на техническое обслуживание и ремонт (плановые и прогнозируемые ремонты); C_s – затраты на время простоя (потери производства); C_{env} – затраты на охрану окружающей среды (загрязнение перекачиваемой жидкостью и вспомогательным оборудованием); C_d – затраты на вывод из эксплуатации/утилизацию (включая восстановление местной окружающей среды и предоставление вспомогательных услуг).

Стоимость жизненного цикла ПТНУ, включающая все затраты потребителя при ее использовании, во многом предопределяет выбор потребителя. При этом следует отметить, что рост уровня качества технической системы сопровождается снижением эксплуатационных расходов и ростом затрат на ее изготовление. Поэтому новые (инновационные) технические системы, имеют более высокую первоначальную стоимость по сравнению с существующими аналогами и обеспечивают на протяжении срока эксплуатации более низкие эксплуатационные расходы.

Результатом осуществления расчета стоимости жизненного цикла является выявление варианта с самой низкой СЖЦ. Мы рекомендуем этот параметр учитывать при подборе ПТНУ методом многокритериальной оптимизации, куда также введены $TEWI$ и $LCCP$ [2].

Результаты

В данной работе приведены результаты по $TEWI$ и $LCCP$, полученные авторами для среднетемпературной ПТНУ, работающей на R1234ze, R1336mzz (E), R600a и R744 (табл.). В качестве эталонного хладагента был принят R410A, как один из наиболее применяемых на данный момент хладагентов в парокомпрессионных системах.

Расчеты выполнены при $t_{in} = 20^\circ\text{C}$ и $t_{кд} = 60^\circ\text{C}$ по методике, указанной в [2], с использованием программы REFPROP 9.0.

Исходя из полученных результатов, наиболее экологически чистым хладагентом с наименьшим GWP является R600a со значением суммарной эмиссии эквивалентного CO_2 за весь период жизненного цикла (15 лет) в 8,64 kg_{CO_2} .



Таблица

**Расчетные значения экологических показателей ПТНУ типа «вода-вода»
при $t_{\text{и}} = 20^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{кд}} = 60^{\circ}\text{C}$**

Хладагент	R1234ze	R1336mzz (E)	R600a	R744	R410a
<i>GWP</i> [3]	7	18	3	1	2000
% от R410a	0,35	0,9	0,15	0,05	100%
<i>TEWI</i> , кгCO ₂ экв	16,33	36,33	8,58	10,43	43,3
% от R410a	37,7	83,9	20,0	24,09	100%
<i>LCCP</i> , кгCO ₂ экв	16,58	36,52	8,64	10,68	45,4
% от R410a	36,2	80,4	19,0	23,52	100%
% от <i>TEWI</i>	+1,51	+0,52	+0,7	+2,4	+4,84

Непосредственный вклад в *TEWI* вносит величина коэффициента преобразования ПТНУ $\mu_{\text{тн}}$. Так, при использовании хладагента, требующего на 3% больше электроэнергии на привод оборудования ТНУ или ХМ, показатель *TEWI* будет почти в 3 раза выше. Так, несмотря на то, что $GWP_{R600a} > GWP_{R744}$ в 3 раза, энергопотребление ПТНУ на R744 на 45,26% больше, чем для ПТНУ на R600a, а значит и удельные косвенные выбросы больше, что подтверждается расчетами. Из рассматриваемых альтернативных рабочих тел наихудшие экологические показатели у R1336mzz (E), т.к. суммарная эмиссия эквивалентного CO₂ за весь период жизненного цикла превышает аналогичный показатель для R600a в 4,2 раза.

Результаты *LCCP* показывают, что производительность системы и выбросы при производстве оборудования являются доминирующими факторами выбросов CO₂ в течение всего срока службы ПТНУ. Результаты сравнения хладагентов на основе *TEWI* и *LCCP* прямо пропорционально и зависят от величины потребляемой энергии со стороны ПКТУ, что также отражается на показателях энергоэффективности системы.

Критерии *TEWI*, *LCCP* и *LCC* целесообразно учитывать при сравнении и подборе энергопреобразующих холодильных систем, применяя метод многокритериальной оптимизации, что поможет пользователю получить более информативное представление о ПТНУ.

Библиографический список

1. Гармонизация методологии определения влияния на климат на протяжении жизненного цикла оборудования (LCCP). 32я информационная записка по холодильным технологиям (октябрь 2016 г.) // Холодильная техника. – 2016. – № 12. – С. 6-11. EDN: [YJYLDN](https://iifir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940) (перевод инф. записки: <https://iifir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940>)
2. Карнаух В.В. Особенности расчета и прогнозирования работы теплонасосных установок на хладагентах четвертого поколения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 202-215. DOI [10.17516/1999-494X-0383](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383). EDN: [DROFQE](https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383)
3. ISO 817:2014. Refrigerants. Designation and safety classification. – Geneva: ISO, 2016. – 73 p.
4. Maykot R., Weber G.C., Maciel R.A. Using the TEWI methodology to evaluate alternative refrigeration technologies // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. – West Lafayette (USA): Purdue University, 2004. – P. 709.
URL: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1708&context=iracc>.
5. Р ИСО 14040-2010. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. – М.: Стандартинформ, 2010. – 19 с.
6. ГОСТ Р 27.202-2012 Надежность в технике. Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла. – М.: Стандартинформ, 2014 – 16 с.



7. Бром А.Е., Белова О.В., Сиссиньо А. Базовая модель стоимости жизненного цикла энергетического оборудования // Гуманитарный Вестник. – 2013. – № 10(13). – С. 115. DOI: [10.18698/2306-8477-2013-10-115](https://doi.org/10.18698/2306-8477-2013-10-115). EDN: [RGTWQV](https://www.edn.ru/10.18698/2306-8477-2013-10-115)
8. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems / 2nd Ed. – Parsippany (USA): Hydraulic Institute, 2021. – 212 p.

References

1. IIR, & Hwang, Y. (October 2016) *Harmonization of Life Cycle Climate Performance Methodology: 32nd Informatory Note on Refrigeration Technologies*. International Institute of Refrigeration (IRR). <https://iifiir.org/en/fridoc/harmonization-of-life-cycle-climate-performance-methodology-139940>
2. Karnaukh, V.V. (2022). Specifics of calculation and prediction of the operation of heat pumps working on fourth generation refrigerants. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies*, 2 (15), 202-215. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0383> [In Russian]
3. ISO (2016). *817:2014. Refrigerants. Designation and safety classification*. International Organization for Standardization.
4. Maykot, R., Weber, G. C. & Maciel, R. A. (2004). Using the TEWI methodology to evaluate alternative refrigeration technologies. In *Proc. International Refrigeration and Air Conditioning Conf.* (paper 709). Purdue University. <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1708&context=iracc>
5. Rosstandart (2010). *R ISO 14040-2010 Ekologicheskij menedzhment. Ocenka zhiznennogo cikla. Principy i struktura* [State Standard R ISO 14040-2010 Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework]. Standartinform [In Russian]
6. Rosstandart (2012). *GOST P 27.202-2012 Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Stoimost' zhiznennogo cikla*. [Dependability in technique. Dependability management. Life cycle costing]. Standartinform [In Russian]
7. Brom, A. E., Belova, O. V. & Sissinyo, A. (2013). Basic model of life cycle costing of the power equipment. *Humanities bulletin of BMSTU*, 2, 115. <https://doi.org/10.18698/2306-8477-2013-10-115> [In Russian]
8. HI. (2021). *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems* (2nd ed.). Hydraulic Institute.

Сведения об авторах

Карнаух Виктория Викторовна, д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» (ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ»), г. Донецк, e-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com.

Байда Борис Юрьевич, ст. преп. кафедры ХТТ ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ».

Приймак Алексей Сергеевич, ассистент кафедры ХТТ ФГБОУ ВО «ДОННУЭТ».

Authors about

Viktoriia Viktorovna Karnaukh, Dr. of Tech. Sciences, Professor of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky, e-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com.

Boris Yuryevich Bayda, Senior lecturer of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.

Alexey Sergeevich Priymak, Assistant of the Refrigerating and Trade Equipment Department, Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky.



ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ

ENERGY AND RESOURCE SAVING IN TECHNOLOGIES



МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И АВТОМАТИКИ

Гаврилова А.А., Сагитова Л.А., Етриванов А.В.

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Аннотация

Обеспечение технологического суверенитета требует масштабной и массовой замены иностранных технических средств в системах контроля и автоматизации многих промышленных предприятий. Эта проблема особенно актуальна для критически важных инфраструктурных объектов, в частности энергоснабжающих систем и предприятий. В статье представлена методика, позволяющая производить сравнительную многокритериальную оценку и выбор контрольно-измерительных приборов (КИП) для комплексного переоснащения систем контроля и управления энергетических предприятий, систем тепло-, электро- и водоснабжения, промышленных и бытовых потребителей. В методике реализуется комплексный подход к решению задачи оптимального выбора на основе методологии Data Envelopment Analysis (DEA). Глобальный критерий эффективности формируется как результат свертки разнородных локальных критериев эффективности измерительных устройств, что позволяет учитывать конкретные технологические требования к средствам и методам измерений, специфику установки и условия эксплуатации приборов. Методика многокритериальной оценки эффективности применения измерительных приборов существенно ускоряет и упрощает процесс объективного выбора оптимальных технических средств, снижает квалификационные требования к пользователям. База данных, алгоритм расчета глобальных критериев могут быть использованы для создания системы поддержки принятия решения (СППР) в рамках систем автоматического проектирования.

Ключевые слова: методология DEA, Data Envelopment Analysis, многокритериальный выбор, КИП, глобальный критерий, эффективность.

METHODOLOGY FOR MULTICRITERIA COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF REPLACING MEASURING INSTRUMENTS AND AUTOMATION

Anna Gavrilova, Lyajsan Sagitova, Aleksandr Etrivanov

Samara State Technical University, Samara

Abstract

Ensuring technological sovereignty requires large-scale and massive replacement of foreign technical means in the control and automation systems of many industrial enterprises. This problem is especially relevant for critical infrastructure facilities, in particular energy supply systems and enterprises. The article presents a methodology that allows for a comparative multi-criteria assessment and selection of control and measuring instruments (measuring-and-recording apparatus) for the comprehensive re-equipment of control and management systems of energy enterprises, heat, electricity and water supply systems, industrial and household consumers. The methodology implements an integrated approach to solving the optimal choice problem based on the Data Envelopment Analysis (DEA) methodology. The global efficiency criterion is formed as a result of the convolution of heterogeneous local efficiency criteria of measuring devices, which makes it possible to take into account specific technological requirements for measuring instruments and methods, the specifics of installation and operating conditions of devices. The method of multi-criteria assessment of the effectiveness of the use of measuring instruments significantly speeds up and simplifies



fies the process of objective selection of optimal technical means and reduces qualification requirements for users. The database and algorithm for calculating global criteria can be used to create a decision support system within the framework of automatic design systems.

Keywords: Data Envelopment Analysis, DEA methodology, multi-criteria selection, control instrumentation, global criterion, efficiency effect.

В настоящее время чрезвычайно актуальной является задача усиления технологической безопасности отечественной промышленности и объектов инфраструктуры, определенная на государственном уровне [1]. Многие промышленные предприятия в последние годы оснащались импортными средствами измерений и автоматизации. Такие автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) контролируются иностранными производителями и подчиняются их дистанционным управляющим воздействиям, могут подвергаться хакерским атакам. Подобное вмешательство в работу энергетических предприятий представляет серьезную опасность для тепло-, водо- и электроснабжения населения и промышленных потребителей [2, 3]. В связи с этими обстоятельствами необходим масштабный и быстрый переход на отечественные средства автоматизации и контроля, упростить который возможно с помощью специализированного программного продукта.

Для решения задачи переоснащения средствами контроля и создания программного продукта разработана методика многокритериальной оценки и выбора измерительных приборов, базирующаяся на методологии Data Envelopment Analysis (DEA) [4-7]. Это непараметрический метод многокритериальной оценки группы действующих объектов, позволяющий выявить эффективные и неэффективные группы оборудования. Данный метод основан на построении так называемой границы эффективности в многомерном пространстве входных и выходных переменных, описывающих объекты, эффективность которых требуется определить.

Эта задача подбора средств КИП требует учета множества разнообразных технических характеристик средств измерений, таких как функциональность, надежность, стоимость, срок службы, доступность сервиса и удобство обслуживания и др.

Рассмотрим пример реализации предлагаемой методики для подбора и замены термометров блочно-модульной котельной. В качестве локальных критериев средств измерения температуры использованы следующие сравнительные характеристики приборов:

- 1) цена – X_1 ;
- 2) класс точности измерения – X_2 ;
- 3) значение требуемой верхней границы (в.г.) диапазона измерения – X_3 ;
- 4) межповерочный период – Y_1 ;
- 5) значение требуемой нижней границы (н.г.) диапазона измерения – Y_2 ;
- 6) наличие унифицированного сигнала – Y_3 .

Вышеперечисленные локальные критерии эффективности сворачиваются в глобальный критерий F по следующему принципу – увеличение выходных параметров Y и уменьшение входных характеристик X приводят к повышению многокритериальной обобщенной эффективности F [6].

Входными характеристиками, X , примем цену, класс точности измерения, значение верхней границы диапазона измерения, уменьшение затрат на которые приводит к повышению показателя суммарной эффективности F :

$$\frac{\partial F(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_j} < 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$



Межповерочный период, значение нижней границы (н.г) диапазона измерения, наличие унифицированного сигнала – выходными параметрами Y , увеличение которых должно приводить к возрастанию суммарного показателя эффективности F :

$$\frac{\partial F(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_j} < 0, i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

Таким образом, представим глобальный критерий эффективности F в виде:

$$F_n = \max_{u_n, v_n \in G} \frac{u_{1n} \cdot Y_{1n} + u_{2n} \cdot Y_{2n} + u_{3n} \cdot Y_{3n}}{v_{1n} \cdot X_{1n} + v_{2n} \cdot X_{2n} + v_{3n} \cdot X_{3n}} \quad (3)$$

Система ограничений весовых коэффициентов:

$$\begin{cases} \frac{u_{1.1} \cdot Y_1 + u_{2.1} \cdot Y_2 + u_{3.1} \cdot Y_3}{v_{1.1} \cdot X_1 + v_{2.1} \cdot X_2 + v_{3.1} \cdot X_3} \leq 1, \\ \frac{u_{1.2} \cdot Y_1 + u_{2.2} \cdot Y_2 + u_{3.2} \cdot Y_3}{v_{1.2} \cdot X_1 + v_{2.2} \cdot X_2 + v_{3.2} \cdot X_3} \leq 1, \\ \vdots \\ \frac{u_{1.8} \cdot Y_1 + u_{2.8} \cdot Y_2 + u_{3.8} \cdot Y_3}{v_{1.8} \cdot X_1 + v_{2.8} \cdot X_2 + v_{3.8} \cdot X_3} \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

$$n \in \{1, 2, \dots, 8\}; i = \{1, 2, 3\}; j = \{1, 2, 3\}.$$

где n – номер прибора; Y_1, Y_2 и Y_3 – выходные параметры объектов; X_1, X_2 и X_3 – значения входных характеристик приборов; G – область значений весов u_{in} и v_{jn} ; u_{1n}, u_{2n}, u_{3n} и v_{1n}, v_{2n}, v_{3n} – положительные весовые коэффициенты.

В табл. 1 представлены значения локальных критериев эффективности приборов [8].

Таблица 1

Локальные критерии эффективности

№	Локальный критерий	Номер измерительного прибора (термометра)*							
		1	2	3	4	5	6	7	8
X_1	Цена	674	710	760	2500	690	18500	18500	18500
X_2	Точность	0,4675	0,9713	0,9713	0,5038	0,9713	0,5038	0,5038	0,5038
X_3	Значение верхней границы	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52
Y_1	Межповерочный период	2	2	2	2	2	4	4	4
Y_2	Значение нижней границы	3	1,9	2,4	3	1,9	10	10	10
Y_3	Унифицированный сигнал	12	12	12	12	12	12	12	12

* Соответствующие номера измерительных приборов: 1 – ТСМ Метран-203(50м); 2 – ТСМ Метран-204(100м); 3 – ТСМ Метран-243(50м); 4 – ТСМ Метран-253(50м); 5 – ТСМ Метран-254(100м); 6 – ТСМ Метран-270; 7 – ТСМ Метран-280; 8 – ТСМ Метран-276

Сравнительная многокритериальная эффективность средств измерения определена для 8 термометров, результаты расчетов глобального критерия представлены на рис. 1, значения весовых коэффициентов приведены в табл. 2.

Полученные результаты позволяют выбрать для отопительной котельной термометры, обладающие максимальной эффективностью №2 и №6 ($F=1$).

Термометры №3 ($F=0,80$) и №7 ($F=0,67$) обладают более низкой эффективностью, но достаточной для использования термометров случае отсутствия максимально эффективных приборов.

Термометры №1 ($F=0,05$), №4 ($F=0,20$), №8 ($F=0,35$) – неэффективны, не рекомендуются использовать их для данного технологического процесса.



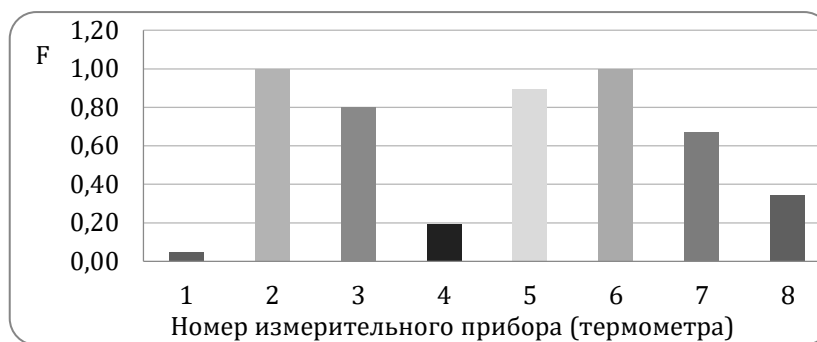
Рис. 1. Значения глобальные критерия F

Таблица 2

Весовые коэффициенты

Номер измерительного прибора (термометра)		1	2	3	4	5	6	7	8
Весовые коэффициенты	u_{1n}	0,0020	0,0008	0,0003	0,0020	0,0000	0,0020	0,0020	0,0020
	u_{2n}	0,9994	3,4109	3,8918	0,9994	3,4340	0,9994	0,9994	0,9994
	u_{3n}	1,0004	0,0000	0,0000	1,0004	0,0000	1,0004	1,0004	1,0004
	v_{1n}	1,1338	0,6362	1,9785	1,1338	0,4202	1,1338	1,1338	1,1338
	v_{2n}	1,2366	1,3666	0,0339	1,2366	1,3131	1,2366	1,2366	1,2366
	v_{3n}	1,6298	0,0000	0,0000	1,6298	0,0000	1,6298	1,6298	1,6298

Эффективность приборов в значительной степени обусловлена соответствием диапазона технологическим требованиям конкретного объекта и точностью измерительных устройств. Минимальное влияние на глобальный критерий всех термометров оказала величина межповерочного периода.

Выводы (Conclusion)

В целом, предложенная методика позволила осуществить объективный многокритериальный выбор термометров. Целесообразно расширить базу данных сведениями о других измерительных средствах с учетом специфики методов измерений, что позволит использовать данную методику для создания системы поддержки принятия решений многокритериального выбора контрольно-измерительных приборов и средств автоматики. Методика существенно сокращает время поиска оптимальных средств измерений для конкретных технологических процессов, в том числе для объектов энергетики.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
2. Керимов Д.А. Импортзамещение в энергетике // Вестник Югорского государственного университета. – 2016. – Вып. 4 (43). – С. 53-55. EDN: [XHNLLJ](#)
3. Алимханова А.Н., Мицель А.А. Оценка эффективности предприятий на основе метода DEA // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 104-108. DOI: [10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108](#). EDN: [FZCGVB](#)
4. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Краткое описание и пример практического применения метода Data Envelopment Analysis (Версия 0.1) [Электронный ресурс]. URL: http://www.morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf (дата обр. 20.11.2023 г.)
5. Моргунов Е. П., Моргунова О. Н. Применение метода Data Envelopment Analysis для оценки эффективности IT-специалистов // Решетневские чтения. – 2017. – Т. 2. – С. 450-451. EDN: [YLZBVM](#)



6. Гаврилова А.А., Салов А.Г. Системная методология анализа и моделирования энергоэффективности генерирующих компаний. Самара: Научно-технический центр, 2021. – 277 с. EDN: [ZZZXNK](#)
7. The DEA Process, Usages and Interpretations / A. Charnes, W.W. Cooper, A.Y. Lewin, L.M. Seiford // Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications. – Dordrecht: Springer, 1994. – p. 425-435. DOI: [10.1007/978-94-011-0637-5_21](#)
8. Метран. Датчики температуры [Сайт]. URL: https://www.metran.ru/catalog/datchiki_temperature/ (дата обр. 20.11.2023 г.)

References

1. Federal'nyj zakon ot 26.07.2017 № 187-FZ "O bezopasnosti kriticheskoj informacion-noj infrastruktury Rossijskoj Federacii. [Federal Law of July 26, 2017 No. 187-FZ "On the security of critical information infrastructure of the Russian Federation.] [In Russian]
2. Kerimov, D. A. (2016) Import substitution energy. *Vestnik YUgorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 4(43), 53-55. [In Russian]
3. Alimhanova, A. N. & Mitcel, A. A. (2019). Evaluation of enterprise performance based on the DEA method. *Proceedings of the TUSUR University*, 22(2), 104-108. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2019-22-2-104-108> [In Russian]
4. Morgunov, E. P. & Morgunova O. N. *Kratkoe opisanie i primer prakticheskogo primeneniya metoda Data Envelopment Analysis (Versiya 0.1)* [Brief description and example of practical application of the Data Envelopment Analysis method (Version 0.1)]. Retrieved December 05, 2023, from http://www.morgunov.org/docs/DEA_intro.pdf [In Russian]
5. Morgunov, E. P. & Morgunova, O. N. (2017). Application of the Data Envelopment Analysis method for assessment of efficiency of IT-specialists. *Reshetnevskie chteniya*, 2, 450-451. [In Russian]
6. Gavrilova A.A. & Salov A.G. (2021). *Sistemnaya metodologiya analiza i modelirovaniya energoeffektivnosti generiruyushchih kompanij* [System methodology for analysis and modeling of energy efficiency of generating companies]. Izd-vo OOO "Nauchno-tehnicheskij centr". [In Russian]
7. Charnes, A., Cooper, W.W., Lewin, A.Y., & Seiford, L.M. (1994). The DEA Process, Usages and Interpretations. In *Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications* (pp. 425-435). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0637-5_21
8. Metran (n.d.). *Datchiki temperature* [Metran. Temperature sensors]. Retrieved December 05, 2023, from https://www.metran.ru/catalog/datchiki_temperature/ [In Russian]

Сведения об авторах

Гаврилова Анна Александровна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», СамГТУ, г. Самара, e-mail: a.a.gavrilova@mail.ru, ORCID [0000-0001-6598-6518](#).

Сагитова Ляйсан Акзамовна, старший преподаватель кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», СамГТУ, г. Самара, e-mail: 10410@mail.ru, ORCID [0000-0002-0833-983X](#).

Етриванов Александр Владимирович, студент группы 4-ТЭФ-1, Теплоэнергетический факультет, СамГТУ, г. Самара, e-mail: aleksandretrivanov@yandex.ru.

Authors about

Anna Aleksandrovna Gavrilova, Cand. of Tech. Sciences, Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes, Samara State Technical University, e-mail: a.a.gavrilova@mail.ru, ORCID [0000-0001-6598-6518](#).

Lyajsan Akzamovna Sagitova, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Samara State Technical University, e-mail: 10410@mail.ru, ORCID [0000-0002-0833-983X](#).

Aleksandr Vladimirovich Etrivanov, student of Samara State Technical University.



Научное издание
«Энергетические системы»
№ 3, 2023 г.

Научный журнал



Учредитель журнала
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Главный редактор
Трубаев Павел Алексеевич

Подписано в печать 22.12.2023 г.

Все публикуемые материалы представлены в авторской редакции.

Адрес редакции: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, УК2, оф. 306.