

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Всероссийская Школа Молодых Ученых

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ, ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ И
ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ СОВРЕМЕННОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Севастополь, 29-30 мая 2024 г.

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Севастополь, 2024 г.

УДК 621.31(063)

ББК 31.27я43

Ц751

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Илюшин Павел Владимирович – доктор технических наук, руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики Института энергетических исследований РАН, руководитель Национального исследовательского комитета С6 «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергоресурсы» РНК СИГРЭ (Москва, Россия).

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Петрова Светлана Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, руководитель магистратуры Energunet компании ООО «Плаг энд плей инжиниринг», заведующий кафедрой «Интеллектуальные сети энергоснабжения» Севастопольского государственного университета (Севастополь, Россия).

Самусенко Андрей Викторович – кандидат технических наук, руководитель магистерской программы «Инженерная электрофизика», Санкт-Петербургский государственный университет. Член Технического комитета по стандартизации ТК 072 «Электростатика» (Санкт-Петербург, Россия).

«Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики», Всероссийская школа молодых ученых (ВШМУ-2024) (1 ; 2024 ; Севастополь)

Ц751 Всероссийская школа молодых ученых «Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики», Севастополь, 29-30 мая 2024 г. : сборник научных трудов / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет ; гл. ред. Илюшин П. В. ; ред. колл.: Петрова С. Ю. [и др.]. – Севастополь : СевГУ, 2024. – 229с. – ISBN 978-5-6051995-4-0.

Сборник содержит материалы Всероссийской школы молодых ученых «Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики» (Севастополь, 29-30 мая 2024 г.), посвященные теоретическим и практическим вопросам, связанных с использованием последних достижений науки и технологии в области информационных технологий интеллектуальной поддержки принятия решений электроэнергетической отрасли.

Все материалы сборника проходят рецензирование и экспертную оценку.

ISBN: 978-5-6051995-4-0

© Севастопольский
государственный университет



**Всероссийская
Школа Молодых Ученых
ЦИФРОВИЗАЦИЯ,
ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ И
ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ
СОВРЕМЕННОЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

СООРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Институт энергетических исследований Российской академии наук

**Национальный исследовательский комитет С6 "Активные
системы распределения электроэнергии и распределенные
энергоресурсы" РНК СИГРЭ**

Тематика Школы представляет широкий спектр исследований и разработок, направленных на совершенствование и оптимизацию современной электроэнергетики с учетом цифровых технологий, экологической устойчивости и децентрализации.

Участники смогут представить свои исследования, обсудить вызовы и возможности, а также найти пути для сотрудничества и развития в этой стратегически важной области.

Организационный взнос отсутствует.

Аннотации докладов конференции размещены на сайте
<https://leader-id.ru/events/486213>

**ДЛЯ УЧАСТИЯ В КОНФЕРЕНЦИИ ТРЕБУЕТСЯ РЕГИСТРАЦИЯ
НА САЙТЕ LEADER-ID** <https://leader-id.ru/events/486213>

Адреса для переписки и телефоны для справок:

г. Севастополь, ул. Университетская, 31, Севастопольский
государственный университет, кафедра Интеллектуальные сети
энергоснабжения ауд. 2.3

E-mail: isenergy@mail.sevsu.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ

В сборнике представлены работы участников Всероссийской школы молодых ученых «Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики». Тезисы докладов по трем направлениям:

1. Цифровизация электроэнергетики: исследование и разработка цифровых технологий и систем управления для оптимизации производства, распределения и потребления электроэнергии. Включает в себя такие аспекты, как смарт-сети, интернет вещей (IoT), облачные вычисления и аналитику больших данных.

2. Декарбонизация энергетики: исследование и разработка методов и технологий, направленных на снижение выбросов парниковых газов и переход к низкоуглеродной или нулевой эмиссии в процессе производства и использования электроэнергии. Включает в себя разработку возобновляемых источников энергии, энергоэффективности, электромобильности и углеродного захвата и хранения.

3. Децентрализация электроэнергетики: исследование и разработка концепций и технологий, направленных на переход от централизованной модели электроэнергетики к децентрализованной. Включает в себя разработку микрогридов, локальных источников энергии (например, солнечных панелей и ветрогенераторов), энергетического хранения и управления энергопотреблением.

Сборник рекомендован профессорско-преподавательскому составу электроэнергетических вузов, студентам, интересующимся научно-исследовательской деятельностью, и аспирантам.

Ответственность за содержание тезисов несут авторы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАДРОКОПТЕРА ПО ВЫСОТЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ VLDC МОТОРА.....	9
АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АККУМУЛЯТОРОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	18
УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ АВТОМОБИЛЬНОГО АДСОРБЕРА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ	29
УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВИЭ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	38
ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ МЕТОДОМ АРГ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....	48
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	59

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЁТА
НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП 10КВ..... 66**

**МОДЕЛЬ СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРОВОДОВ ВЛЭП ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ 73**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ
ВЫБОРКЕ ДАННЫХ..... 78**

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО АЛГОРИТМА АНАЛИЗА
КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ..... 104**

**ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОВМЕСТНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЯЗИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
СЕТЕЙ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ УМНОГО ГОРОДА 112**

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОПИТАНИЕМ ОТ КОМПЛЕКСА
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ..... 118**

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ
ИНЕРЦИИ КАК ЧАСТИ ВИРТУАЛЬНОГО
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СЛАБОЙ СЕТИ 123**

**МЕТОДИКА ЦИФРОВОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 130**

**МЕТОДИКА КРАТКОСРОЧНОГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ 138**

**ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВНЕДРЕНИЕМ
АВТОКЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ..... 146**

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ И ПРОТОЧНЫХ
НАКОПИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ 158**

**О РОЛИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В РЕШЕНИИ
ПРОБЛЕМЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ 168**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ
ЛЭП НАПРЯЖЕНИЕМ 10 КВ В ВЫСОКОГОРНОЙ
МЕСТНОСТИ..... 176**

**ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ..... 184**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ..... 193**

**ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ НА ПРИМЕРЕ ОПОР
ЛЭП..... 199**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЕ ДУГИ ЗАМЫКАНИЯ
МЕЖДУ НЕИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ВЛ 208**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ
СТАЛЕАЛЮМИНЕВОГО ПРОВОДА
ПОВРЕЖДЁННОГО МЕЖФАЗЫМ ЗАМЫКАНИЕМ.. 212**

**АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ОБ
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ... 218**

УДК: 681.53

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАДРОКОПТЕРА ПО ВЫСОТЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ BLDC МОТОРА

Фам Чонг Хай (tronghai180598@gmail.com)

А.М Гунько (amg17@tpu.ru)

Томский политехнический университет, Томск

В работе представлены результаты моделирования переходного процесса системы управления полётом квадрокоптера на языке Python при изменении высоты в условиях воздействия шума на осях ротора бесколлекторного двигателя постоянного тока (BLDC). На основе математической модели квадрокоптера, построены алгоритмы управления при отсутствии шума и при учёте воздействия шума. Применён фильтр Калмана с учётом динамики квадрокоптера и составляющих компонентов шума. Для стабилизации в системе управления квадрокоптера применён ПИД регулятор. Предложенный подход даёт возможность более качественно анализировать работу замкнутых контуров управления и учитывать динамические процессы в BLDC моторе для разработки эффективных моделей системы управления.

Ключевые слова: квадрокоптер, ПИД-регулятор, случайный шум, БПЛА, фильтр Калмана, BLDC

Введение

В последние годы беспилотные летательные аппараты (БПЛА), включая квадрокоптеры, привлекают значительное внимание в связи с широким спектром перспектив их применения в различных областях. Квадрокоптеры, как одна из разновидностей беспилотных летательных аппаратов, особенно привлекают внимание своей маневренностью и компактностью.

Они обеспечивают подъемную силу и летательное движение благодаря вращению своих роторов [Lopez-Sanchez et al., 2023], [Калягин М. Ю и другие., 2020], [Лысухо Г. В., 2020]. При вращении квадрокоптера два винта, расположенных напротив друг друга, вращаются по часовой стрелке, в то время как два других винта вращаются в противоположном

направлении [Красовский А. Н и другие., 2016]. Такая конфигурация обеспечивает компенсацию крутящего момента, который создается вращающимися винтами и также предотвращает неконтролируемое вращение квадрокоптера, его конструкция показана на рис.1.

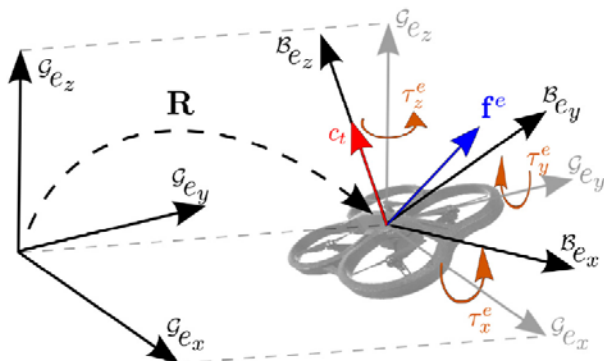


Рис. 1. Силы и моменты, действующие на систему

Для обеспечения необходимой стабильности управления беспилотными летательными аппаратами в настоящее время используются различные методы управления. Один из таких методов, который применяется уже давно и до сих пор широко используется - это ПИД-регуляторы. Это незаменимые регуляторы благодаря своей стабильности и устойчивости [Zhou L et al., 2022].

В процессе полета, на квадрокоптер воздействуют случайные внешние шумы и внутренние шумы, вызываемые его двигателями, которые могут влиять на его работу. В данной работе будут представлены результаты моделирования квадрокоптера в идеальных условиях и при воздействии этих шумов на входе датчика.

Несмотря на применение устойчивого ПИД-регулятора в системе управления квадрокоптера, эффективное управление практически ухудшается при воздействии этих шумов. В реальной жизни, чтобы убрать шумы и сгладить траекторию полета, часто используют множество фильтров. Одним из незаменимых фильтров в современных БПЛА является фильтр Калмана. Фильтр Калмана выделяется как оптимальный оценщик, особенно подходящий для систем, характеризующихся измерениями датчиков, подверженными шумам [Oloo J. O., 2021], [Шафигуллин И. Д., 2019].

Математическая модель квадрокоптера

Квадрокоптер представляет собой комплексную систему, фокусирующуюся на контроле шести степеней свободы в трехмерном пространстве управляется только всего четырьмя моторами [Shaikh B., et al 2019].

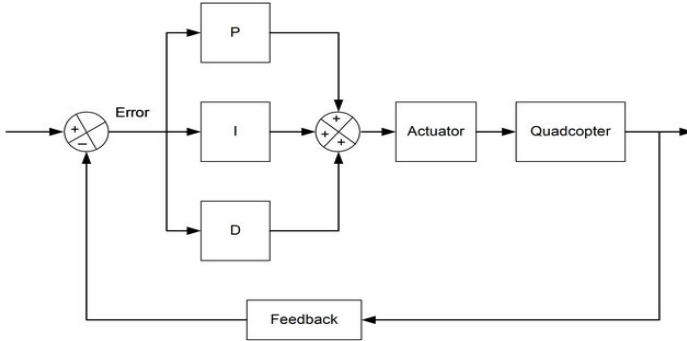


Рис. 2. Схема алгоритма работы системы управления

Изменение скорости вращения роторов на разных сторонах квадрокоптера приводит к различным силам тяги, вызывая изменение угла ориентации тангаж (ϕ), крен (θ) и рыскание (ψ). Этот процесс, в свою очередь, порождает крутящие моменты вокруг осей x , y , z [Melo A. G. et al., 2022].

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\
 \ddot{y} &= (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\
 \ddot{z} &= -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{u_1}{m} \\
 \ddot{\phi} &= \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{u_2}{I_{xx}} \\
 \ddot{\theta} &= \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{u_3}{I_{yy}} \\
 \ddot{\psi} &= \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{u_4}{I_{zz}}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

где: u_1, u_2, u_3, u_4 – векторы моментов и подъема, как векторы управления,

$$\begin{cases} u_1 = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ u_2 = lk(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ u_3 = lk(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ u_4 = b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (1.2)$$

ω – угловая скорость двигателей: $\omega = \omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4$, b – некоторая константа подходящего сопротивления, l – расстояние от центра масса квадрокоптера до центра двигателей, k – некоторая константа подходящей тяги, I – момент инерции.

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix}$$

Управление квадрокоптером выполняется отдельными блоками ПИД-регуляторов по трем углам (крен, тангаж, рыскание) и высоте (z). Общая форма ПИД регулятора имеет вид:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \\ e(t) &= x_d(t) - x(t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

В данной работе исследуется только контроллер по оси z , применяемый для стабилизации высоты квадрокоптера до заданного значения. Аналогично контроллерам углового положения, данный контроллер использует ПИД-регулятор для управления высотой. Требуемая тяга рассчитывается согласно следующему уравнению:

$$\begin{aligned} T &= m \cos \phi \cos \theta [g + K_{z,p} e_z(t) + K_{z,I} \int e_z(t) dt + K_{z,D} \dot{e}_z(t)] \\ e_z(t) &= z_d(t) - z(t) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Поскольку тяга рассчитывается в системе отсчета тела, а g и другие члены ПИД находятся в инерциальной системе отсчета, матрица вращения применяется к членам в инерциальной системе отсчета, которая имеет функцию $\cos\phi\cos\theta$.

Как было указано ранее, на квадрокоптер воздействуют случайные внешние шумы с помощью функции `random` и внутренние шумы, вызываемые его двигателями, которые обозначаются как две синусоидальные функции. Их составляющие можно выбрать на основе

моделирования BLDC мотора, представленного в работе [Хай Фам Чонг и другие., 2023], который можно обозначить следующим образом:

$$A = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + \text{random}(-1, 1) \quad (1.5)$$

A_1 , A_2 , ω_1 , ω_2 – соответственно амплитуда и частота переходного процесса и магнитного переключения двигателей во время переходе ($A_1 > A_2$ и $\omega_1 < \omega_2$).

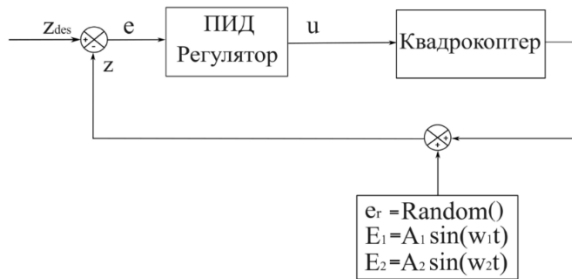


Рис. 3 – Замкнутый контур управления квадрокоптером с воздействием шумов

Для устранения отклонений и выбросов относительно вектора состояния предложено применить линейный фильтр Кальмана [Мальцев, А. С и другие., 2022].

Фильтрация Кальмана включает этапы предсказания:

$$\hat{x}_k = F_k x_{k-1} + B_k u_{k-1}$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k$$

и этапы коррекции:

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1}$$

$$x_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k$$

(1.6)

где: F^k – матрица моделт двидения по высоте; B_k – матрица входного управления; H – матрица модели управления; P_k , K_k , Q_k – ковариационные матрицы состояния, шума измерений, ошибки модели соответственно.

$$F = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Результаты моделирования квадрокоптера

Параметры квадрокоптера, используемые для моделирования в таблице:

Табл. 1.

$I_{xx} = I_{yy} = I_{zz}$	m	k	l	b
6.75×10^{-4}	0.5	3.98×10^{-8}	0.22	1.8×10^{-9}

На рисунке 3 представлен результат моделирования с влиянием обычного ветра без воздействия других случайных шумов. Заметно, что с помощью ПИД-регулятора система управления квадрокоптера устойчива к постоянному влиянию ветра.

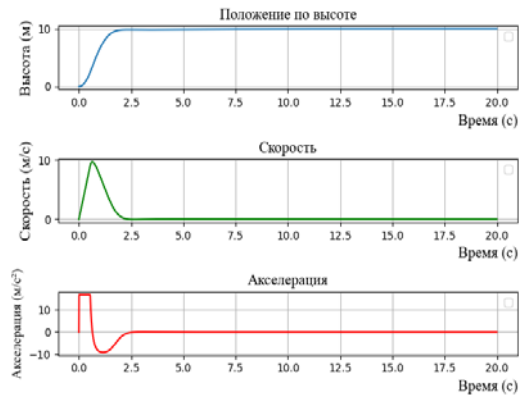


Рис. 3. Результат моделирования без воздействия случайного шума

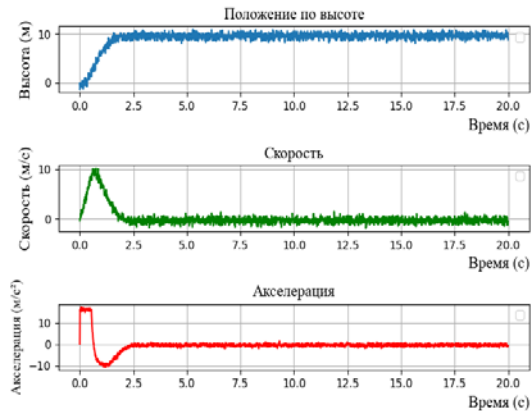


Рис. 4. Результат моделирования с воздействием шумов

На рисунке 4 показан результат моделирования по высоте, скорости и ускорению квадрокоптера с воздействием шумов.

На рисунке 5 показан результат моделирования системы управления при воздействии вышеупомянутых шумов с помощью фильтра Калмана.

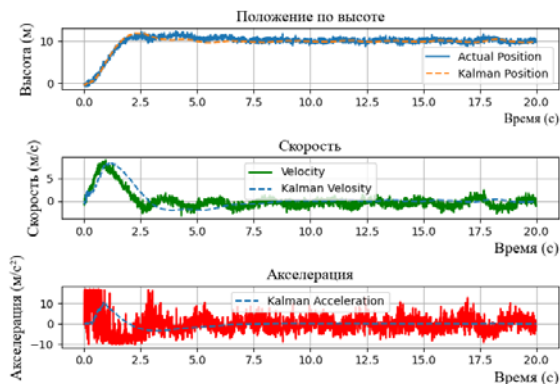


Рис. 5. Результат моделирования с применением фильтра Калмана

Результаты моделирования показывают, что при таких шумовых параметрах, фильтр Калмана оказывается более эффективным, но поскольку не учитывает полный и подробный анализ модели, поэтому действительно его работа ухудшается. Чтобы достичь желаемых результатов, следует применять более сложную модель, которая учитывает дополнительные факторы и параметры, влияющие на динамику системы.

Заключение

В статье представлен подход к моделированию беспилотного летательного аппарата типа «квадрокоптер» на ранних стадиях проектирования с использованием программированном языке Python. Спроектированная модель позволяет проводить оценку разрабатываемых систем стабилизации и систем управления летательным аппаратом для БПЛА, выполненного по аэродинамической схеме «квадрокоптер» без запуска самого квадрокоптера.

Такой подход позволяет достичь баланса между требуемой устойчивостью и минимизацией воздействия шумовых факторов. Данный аспект заслуживает дальнейшего исследования, направленного на создание адекватной модели объекта, способной эффективно функционировать в реальных условиях, включая подавление воздействия помех на систему управления квадрокоптером.

Список литературы

- [1]. Lopez-Sanchez, Ivan, and Javier Moreno-Valenzuela. PID control of quadrotor UAVs: A survey. *Annual Reviews in Control* 56 (2023), pp. 100900.
- [2]. Калягин М. Ю., Волошин Д. А., Мазаев А. С. Моделирование системы управления полетом квадрокоптера в среде Simulink и Simscape Multibody //Труды МАИ. – 2020. – №. 112. – С. 20.
- [3]. Лысухо Г. В, and Андрей Л. М. Квадрокоптер: динамика и управление //Политехнический молодежный журнал МГТУ имени НЭ Баумана. Электронный журнал 5 (2020).
- [4]. Красовский А. Н., Суслова О. А. О математической модели управляемого движения дрона-квадрокоптера //Аграрный вестник Урала. – 2016. – №. 4 (146). – С. 55-59.
- [5]. Zhou L., Pijonkin A., Singh P. K. Modeling and PID control of quadrotor UAV based on machine learning //Journal of Intelligent Systems. – 2022. – Т. 31. – №. 1. – С. 1112-1122.
- [6]. Oloo J. O. Design of Extended Kalman Filter Optimized Fuzzy PID Controller for a Quadcopter in the Event of One Rotor Failure : дис. – JKUAT-COETEC, 2021.
- [7]. Шафигуллин И. Д. Применение комплементарного фильтра при определении углов крена и тангажа в квадрокоптере //XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – 2019. – С. 648-653.
- [8]. Shaikh B., Nighat A., Chowdhry B. S. Controlling the Altitude Dynamics of Quadcopter using Robust Output Feedback Controller //3с Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme. – 2019. – Т. 8. – №. 1. – С. 384-401.
- [9]. Melo A. G. et al. Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 6. – С. 2173.
- [10]. Хай Фам Чонг, et al. Стенд для исследования фильтра калмана в системе управления мультикоптером, смоделированным в среде Matlab //Бутаковские чтения: сборник статей III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, 12-14 декабря 2023 г., Томск. Томский политехнический университет, 2023.
- [11]. Мальцев, А. С., and А. П. Ян. "Система управления движением квадрокоптера на основе каскадных фильтров Калмана." *Автометрия* – 2022. – №. 58.4. DOI: 10.15372/AUT20220403

DYNAMIC MODELING AND SIMULATION OF A QUADROCOPTER IN HEIGHT TAKEN INTO ACCOUNT OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE BLDC MOTOR

Pham Trong Hai (tronghai180598@gmail.com)

A.M. Gunko (amg17@tpu.ru)

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk

The paper presents the results of modeling the transient process of a quadcopter flight control system in Python when changing altitude under conditions of noise exposure on the rotor axes of a brushless direct current (BLDC) motor. Based on the mathematical model of the quadcopter, control algorithms were constructed in the absence of noise and taking into account the effects of noise. A Kalman filter was applied taking into account the dynamics of the quadcopter and the noise components. To stabilize the quadcopter control system, a PID controller is used. The proposed approach makes it possible to better analyze the operation of closed control loops and take into account dynamic processes in the BLDC motor to develop effective models of the control system.

Keywords: quadcopter, PID controller, random noise, UAV, Kalman filter, BLDC

УДК 621.355.1

АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АККУМУЛЯТОРОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЙ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Х. Х. Ш. Ле Жа (*sonsevas98@gmail.com*)

Национальный Томский политехнический университет, Томск
Д. З. Нгуен (*nguyenzuy151099@gmail.com*)

Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С.
Нахимова, Севастополь

Ф. Н. Хоанг (*namhp0108@gmail.com*)

Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С.
Нахимова, Севастополь

При оценке состояний литий-ионного аккумулятора (ЛИА) адекватность его математической модели оказывает значительное влияние на точность прогнозирования. В данной работе выполнен анализ некоторых математических моделей ЛИА, включая модели Шеферда, Тевенина, DP-модель и электрохимическую модель. Для каждой модели были проанализированы их характеристики с точки зрения соответствия экспериментальным данным. В результате анализа было показано, что электрохимическая модель оказалась наиболее точной в описании внутренних процессов аккумулятора. Это проявляется в более точном предсказании электрохимических реакций, динамики заряда/разряда, а также учёта деградации.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, модель Шеферда, модель Тевенина, DP-модель

Введение

В современном обществе литий-ионные батареи становятся все более важным элементом систем накопления электроэнергии, благодаря своим высоким номинальному напряжению, плотности энергии. Однако, увеличение числа термических аварий обуславливает необходимость решения задач оценки состояния и прогнозирования предаварийных состояний батарей. В контексте оценки состояния ЛИА, адекватность его математической модели играет ключевую роль в точности прогнозирования. Поэтому в рамках данного исследования мы проводим

анализ свойств некоторых математических моделей ЛИА, таких как модель Шеферда, модель Тевенина, DP-модель и электрохимическая модель.

1. Свойства математической модели

Свойства математической модели могут оцениваться по следующим критериям:

1. Сложность модели. Этот аспект отражает степень сложности модели и его значимость для возможности и эффективности применения модели в практике.
2. Сложность идентификации параметров модели. Данный критерий связан с тем, насколько сложно определить параметры модели на основе экспериментальных данных. Это свойство существенно влияет на применимость модели в реальных условиях.
3. Адекватность описания внутренних процессов. Важно, чтобы модель достаточно точно отражала внутренние электрохимические процессы, происходящие внутри аккумулятора. Неадекватная модель может привести к неточной оценке состояния аккумулятора и батареи в целом.
4. Валидация модели. Этот процесс важен для оценки соответствия модели экспериментальным данным, что подтверждает её надежность и точность.

Каждое из этих свойств важно для адекватной оценки состояния и прогнозирования поведения литий-ионных аккумуляторов. Результаты исследования, проведенные в [Meng et al., 2018] показали, что точность прогнозирования состояния ЛИА сильно зависит от соответствия его математической модели реальному состоянию аккумулятора.

2. Варианты математических моделей

Модель Шеферда [Shepherd, 1965], разработанная Джоном Шефердом, фокусируется на диффузии лития в электродах батареи и в электролите. Данная модель представляет собой упрощенную электрическую схему (рис. 1), предназначенную для описания основных нелинейных характеристик аккумулятора с использованием полиномов низкого порядка. Уравнение, описывающее эту модель, формулируется следующим образом [Tremblay et al., 2009]:

$$U_{\text{вых}}(t) = E_0 - K \frac{Q}{Q + 0, i(t)} i_{AK}(t) - K \frac{Q}{Q - i(t)} + Ae^{(-Bi(t))} - R_0 i_{AK}(t), \quad (1)$$

Принятые обозначения: E_0 – максимальное напряжение аккумулятора, В; R_0 – внутреннее сопротивление, Ом; K – поляризационная

составляющая, В; A – экспоненциальная составляющая, В; B – инверсная экспоненциальная составляющая, $Aч^{-1}$; Q – полная емкость аккумулятора, $Aч$; $i_{AK}(t)$ – текущее значение тока разряда аккумулятора, А; интегральная величина $i(t) = \int i_{AK}(t)dt$, определяется протекающим током в аккумуляторе, $Aч$.

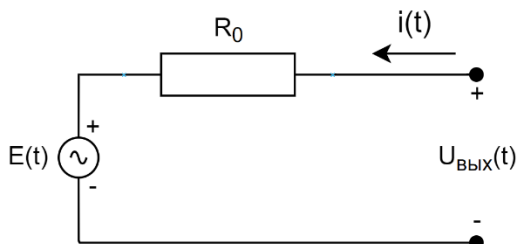


Рис 1. Схема замещения аккумулятора по модели Шеферда

Модель получила широкое применение благодаря своему простому уравнению и возможности получения параметров на основе данных, предоставленных производителями аккумуляторов, а также данных, полученных экспериментальным путем. Это делает ее весьма удобной для научных и инженерных исследований [А.А. Брянцев и др., 2019a][Возмилов и др., 2022][Обухов и др., 2023].

Модель Шеферда успешно описывает напряжение холостого хода аккумулятора при постоянном токе, как было доказано в ряде исследований. В работе [А.А. Брянцев и др., 2019a] было обнаружено, что предложенная модель ЛИА демонстрирует максимальную погрешность не более $\pm 1\%$ по сравнению с имитационной моделью LiNiO₂ на всем диапазоне зарядных и разрядных характеристик аккумулятора. В исследовании [Возмилов и др., 2022] авторы подтвердили соответствие полученных данных идеализированной модели Шеферда. Среднеквадратичное отклонение всех точек от данной модели составило 2,6%, что свидетельствует о высокой схожести между экспериментальными значениями и предсказаниями модели Шеферда. В исследовании [Hussein et al., 2011] также отмечается, что модель Шеферда хорошо описывает напряжение холостого хода при постоянном токе по сравнению с другими моделями, такими как линейная модель и RC-модель. Однако выявлено, что в начале и конце участков моделирования модель Шеферда показывает большую погрешность при оценке степени заряженности (SOC). Результаты исследования в [Nemi et al., 2020] показали минимальные

расхождения между измеренным напряжением холостого хода и смоделированными значениями при различных температурах окружающей среды. Так, при температурах 0°C и 10°C наблюдается увеличение расхождения, особенно к завершению разрядного режима. В [Tremblay et al., 2009] отмечается, что ошибка между смоделированным напряжением на основе модели Шеферда и реальным напряжением составляет до 3% для степени заряженности в диапазоне от 100% до 20% в режиме заряда и разряда.

Это подтверждает, что модель достаточно точна и адекватна для прогнозирования и оптимизации работы литиево-ионных аккумуляторов в различных условиях эксплуатации. Существует множество способов повышения точности модели, и одним из них является введение дополнительных параметров [Li et al., 2011]. В работах [Seitl et al., 2014][Seitl et al., 2013] авторы предложили расширенную модифицированную модель Шеферда, которая учитывает отношение с степенью заряженности. Результаты сравнения с экспериментальными данными показали, что представленная модель хорошо описывает напряжение холостого хода с коэффициентом детерминации 0.9994, что существенно выше, чем у модифицированной модели Шеферда.

Однако до настоящего времени использованная модель ограничивалась статическими режимами, не включает анализ динамических или временных характеристик батареи, такие как переходные процессы, изменения во времени и реакцию на различные динамические нагрузки.

Модель Тевенина – это электрическая схема, которая аппроксимирует сложные электрохимические процессы в аккумуляторе. Модель эквивалентной схемы Тевенина служит абстракцией ЛИА, основанной на резистивных и емкостных характеристиках, а также на теореме Тевенина. Данная модель характеризуется соответствующими уравнениями (рис. 2):

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i(t)}{C_p(t)} - \frac{U_p(t)}{R_p(t) \cdot C_p(t)} \\ U_{вых}(t) = E(t) \pm R_0 \cdot i(t) + U_p(t) \end{cases}, \quad (2)$$

Здесь, U_p представляет собой напряжение на конденсаторе C_p , $i(t)$ обозначает ток заряда/разряда, R_p – поляризационное сопротивление и C_p – поляризационный конденсатор.

В [Belmajdoub et al., 2024] авторы показали, что параметры модели могут легко определяться на основе экспериментальных данных. В [Hentunen et al., 2014] авторы предложили метод идентификации параметров модели, основанный на анализе вольт-релаксационных характеристик экспериментов по импульсному разряду и импульсному

заряду. Отмечается, что эксперименты по извлечению моделей легко программировать и выполнять, а процесс параметризации можно полностью автоматизировать.

В результате моделирования и сопоставления с моделями Шеферда было показано более высокая точность воспроизведения как медленных, так и быстрых динамических характеристик ЛИА [А.А. Брянцев и др., 2019b].

В работе [Zhang et al., 2018] авторы показали, что модель Тевенина демонстрирует высокую точность при оценке SOC аккумулятора при стабильном токе заряда/разряда, значения которой обычно находятся в пределах от 0,2 до 0,8.

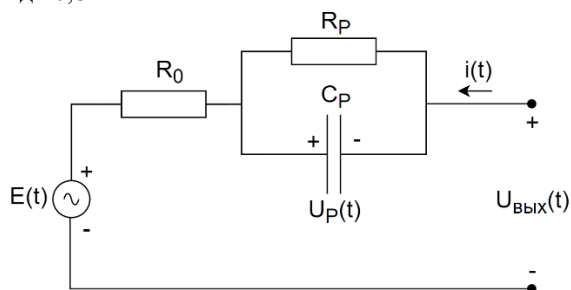


Рис 2. Схема замещения аккумулятора по модели Тевенина

Модель Тевенина характеризуется постоянством своих параметров, что облегчает её анализ. Однако в современных условиях это свойство часто рассматривается как недостаток данной модели [Barcelona et al., 2017]. В последние годы появились новые требования и вызовы, которые ставят под вопрос применимость постоянных параметров в модели Тевенина. Научные исследования направлены на корректировку данного аспекта с целью улучшения прогностических возможностей модели и её адаптации к изменяющимся условиям. Эти усовершенствования могут включать в себя введение переменных параметров или учет дополнительных факторов, чтобы более точно отразить современные аспекты объекта исследования. Подходящая адаптация модели Тевенина может повысить её релевантность и эффективность в условиях современной научной практики.

Так, в работе [Haizhou, 2017] были выявлены недостатки модели Тевенина, включая фиксированное значение напряжения холостого хода как в начальных условиях, так и в реальном эксплуатационном режиме. На практике значение напряжения холостого хода аккумулятора может изменяться в зависимости от реальных условий эксплуатации. Это обстоятельство может привести к неточному анализу внутренних характеристик аккумулятора.

Подход к улучшению модели может включать в себя более глубокий анализ влияния различных переменных на параметры модели Тевенина. В работе [Rahimi-Eichi et al., 2013] исследование выявило, что параметры модели подвержены изменениям при различных значениях SOC, скорости заряда/разряда, температуры и интенсивности процесса старения. Авторы также демонстрируют, что пренебрежение этими изменениями параметров в процессе автономной идентификации приводит к появлению переходных и установившихся ошибок в результатах оценки SOC. В данном контексте, модель Тевенина эффективно учитывает эффект релаксации, что обеспечивает высокую точность моделирования. Такая способность модели Тевенина к оценке эффекта релаксации является важным аспектом, обеспечивающим достоверность результатов и повышающим применимость модели в условиях изменяющихся параметров батареи.

Модели Шеферда и Тевенина имеют свои достоинства при моделировании аккумулятора литий-ионной батареи (ЛИАБ), и объединение этих моделей для получения более оптимального результата рассмотрено в работе [Bae et al., 2014].

Авторы статьи [He et al., 2011] показали, что модель Тевенина ранее широко применялась благодаря ее надежности для описания режима разряда батареи при стабильном токе и напряжении. При этом поляризационная характеристика является важным аспектом при моделировании аккумулятора. Однако использование модели Тевенина для описания процессов в ЛИА имеет свои ограничения. Различия между концентрационной и электрохимической поляризацией могут привести к неточностям в моделировании, особенно в моменты окончания заряда или разряда аккумулятора. Учитывая такой сложный процесс внутри аккумулятора, модель Тевенина оказывает недостаточную точность для описания состояний батареи в начале и конце рабочего цикла. В связи с этим используется улучшенная модель Тевенина второго порядка, известная как DP-модель.

DP-модель

В отличие от модели Тевенина, DP-модель включает дополнительную RC-пару, отражающая свойства поляризационной характеристики аккумулятора. Этот подход способствует более точному описанию и анализу динамики аккумулятора в различных фазах его эксплуатации [He et al., 2011]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i_L(t)}{C_p(t)} - \frac{U_p(t)}{R_p(t) \cdot C_p(t)} \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{i_L(t)}{C_c(t)} - \frac{U_c(t)}{R_c(t) \cdot C_c(t)} \\ U_{\text{вых}}(t) = U_{oc}(t) - R_0 \cdot i_L(t) - U_p(t) - U_c(t) \end{array} \right. \quad (3)$$

Электрическая схема замещения DP-модели представлена на рис. 3. Модель включает ряд элементов: резистор R_0 , связанный с внутренним сопротивлением электродов, электролита и сепаратора; конденсатор C_c , учитывающий эффект емкости двойного слоя; резистор R_p и конденсатор C_p , представляющие собой сопротивление и емкость твердотельного интерфейсного слоя; резистор R_c , связанный с эффектом переноса заряда.

С использованием дополнительной RC-пары DP-модель показала более высокую точность по сравнению с моделью Тевенина. Однако такой подход моделирования также влечет за собой увеличение сложности модели и требует значительных вычислительных ресурсов [Belmajdoub et al., 2024][Nikolian et al., 2016].

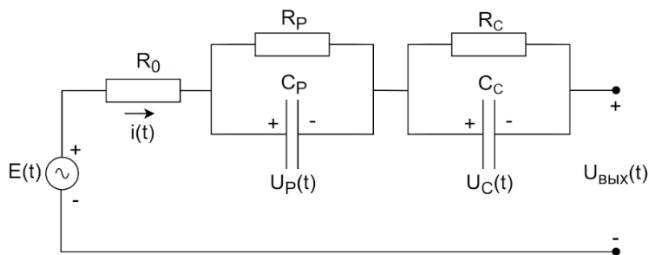


Рис 3. Схема замещения аккумулятора по DP-модели

В настоящее время существует множество методов идентификации параметров модели, включая применение уравнения регрессии [He et al., 2011], в результате исследования показали высокий коэффициент детерминации 0,999. В [Li et al., 2018] авторы предлагают новый метод идентификации параметров модели, обеспечивающий превосходную точность при различных температурах при приемлемой вычислительной нагрузке.

Точная идентификация параметров позволяет моделировать внутренние характеристики аккумулятора, такие как терминальное напряжение,

поляризационное напряжение и степень заряженности, с высокой точностью. В работе [He et al., 2011] авторы сравнили результаты моделирования с экспериментальными данными и отметили, что DP-модель демонстрирует высокую точность при описании динамических процессов внутри аккумулятора при использовании надежного расширенного фильтра Калмана. Ошибка моделирования терминального напряжения составляет менее 0,4%, а степени заряженности – менее 0,3%.

Электрохимическая модель

Для достижения точного описания внутренних процессов аккумулятора на всех этапах моделирования применяется электрохимическая модель. Эта модель учитывает все химические реакции, происходящие при зарядке и разрядке батареи, а также влияние таких факторов, как температура, степень заряженности, состояние износа и другие. При этом модель демонстрирует высокую точность в моделировании аккумулятора. Однако данная модель также представляет собой сложную систему, требующую от исследователей глубоких знаний о батареях и значительных временных затрат на проведение исследований.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением электрохимической модели на основе концепции «черного ящика». Модели «черного ящика» основаны исключительно на вычислительных данных для воспроизведения связи между входными и выходными параметрами задачи, без углубления в исследование внутренних электрохимических процессов аккумулятора.

В [Chrenko et al., 2022] на основе модели «черного ящика» авторы провели исследование процесса старения ЛИА. Во входные параметры модели входят многие параметры, такие как количество циклов, тип режима, разрядная емкость, основанная на средней разряженной емкости, разброс напряжения между ячейками, разница между входным и выходным напряжением на каждом заряде, время хранения. Выходными данными являются – внутреннее сопротивление и интервал жизненного цикла.

В этой работе для оценки отношения между входными и выходными данными авторы предлагают применение двух известных алгоритмов: оптимизацию роя частиц и генетический алгоритм.

При валидации модели было проведено сравнение результата моделирования с экспериментальными данными семи батарей. В результате исследований установлено, что модель демонстрирует очень неравномерную эволюцию значений внутреннего сопротивления по сравнению с реальными данными. Это происходит из-за значительного упрощения уравнения, используемого для разработки модели прогнозирования.

Представленная модель «черного ящика» показала, что довольно простая модель может дать хороший прогноз оставшегося срока службы батареи, учитывая изменения параметров. Более того, для этой модели

требуется ограниченный объем памяти, и она может работать в режиме реального времени.

Заключение

В результате анализа публикаций было выявлено, что каждая модель ЛИА обладает своими преимуществами и недостатками при описании внутренних процессов аккумулятора. Модель Шеферда хорошо подходит для определения напряжения холостого хода аккумулятора, однако она демонстрирует недостаточную точность на начальном и конечном этапах моделирования. Для оценки таких характеристик, как степень заряженности и степень технической годности аккумулятора, более предпочтительны модели Тевенина и DP-модель. Несмотря на то, что DP-модель обладает более высокой точностью, её сложность требует значительных вычислительных ресурсов по сравнению с моделью Тевенина.

При использовании модели «черного ящика» для получения точных выходных данных требуется значительное количество входных данных и сложные вычислительные процессы для получения передаточной функции. Однако также было показано, что данная модель способна достаточно точно описывать выходные данные для нескольких подходящих типов батарей.

Таким образом, выбор оптимальной модели ЛИА зависит от конкретных требований и ограничений, включая доступные вычислительные ресурсы и уровень желаемой точности.

Список литературы

- [1] A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela, Time-domain parameter extraction method for Thévenin-equivalent circuit battery models, in: IEEE transactions on energy conversion, 2014, 29(3), pp. 558–566.
- [2] A. Nikolian et al., Lithium Ion Batteries—Development of Advanced Electrical Equivalent Circuit Models for Nickel Manganese Cobalt Lithium-Ion, in: Energies, 2016, 9(5).
- [3] A.A.H. Hussein, I. Batarseh, An overview of generic battery models, in: 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp. 1-6.
- [4] C. Seitzl et al., Power hardware-in-the-loop implementation and verification of a real time capable battery model, in: 2014 IEEE 23rd international symposium on industrial electronics (ISIE), 2014, pp. 2285-2290.
- [5] C. Seitzl et al., Selection and implementation of a generic battery model for PHIL applications, in: IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 5412-5417.

- [6] C.M. Shepherd, Design of primary and secondary cells: II. An equation describing battery discharge, in: Journal of the electrochemical society, 1965, 112(7).
- [7] D. Chrenko, et al. Aging Study of In-Use Lithium-Ion Battery Packs to Predict End of Life Using Black Box Model, in: Applied Sciences, 2022, 12(13).
- [8] H. He, R. Xiong and J. Fan, Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, in: Energies, 2011, 4(4), pp. 582-598.
- [9] H. Hemi, N.K. M'Sirdi, A. Naamane, A new proposed shepherd model of a li-ion open circuit battery based on data fitting, in: IMAACA 2019, 2020.
- [10] H. Rahimi-Eichi et al., Sensitivity analysis of lithium-ion battery model to battery parameters, in: IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, pp. 6794-6799.
- [11] H. Zhang, W. Na and J. Kim, State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using Neural Network Based on an Improved Thevenin Circuit Model, in: 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2018, pp. 342-346.
- [12] J. Meng et al., Overview of Lithium-Ion Battery Modeling Methods for State-of-Charge Estimation in Electrical Vehicles, in: Applied Sciences, 8(5).
- [13] K. Li et al., A Practical Lithium-Ion Battery Model for State of Energy and Voltage Responses Prediction Incorporating Temperature and Ageing Effects, in: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8), pp. 6696-6708.
- [14] K.-C. Bae et al., LiFePO₄ Dynamic Battery Modeling for Battery Simulator, in: 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2014, pp. 354-358.
- [15] N. Belmajdoub et al., Review of battery models and experimental parameter identification for lithium-ion battery equivalent circuit models, in: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2024, 33(3), pp. 1336-1346.
- [16] O. Tremblay, L.A. Dessaint, Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications, in: World electric vehicle journal. Multidisciplinary digital publishing institute, 2009, 3(2), pp. 289-298.
- [17] S. Barcellona and L. Piegari, Lithium Ion Battery Models and Parameter Identification Techniques, in: Energies, 2017, 10(12).
- [18] S. Li, B. Ke, Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches, in: 2011 IEEE power and energy society general meeting, 2011, pp. 1-8.

- [19] Z. Haizhou, Modeling of Lithium-ion Battery for Charging/Discharging Characteristics Based on Circuit Model, in: International Journal of Online Engineering (iJOE), 2017, 13(06), pp. 86-95.
- [20] Брянцев А.А., Букреев В.Г. Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – 2019 – Vol. 22 – No. 1 – С. 95–99
- [21] Брянцев А.А., Букреев В.Г., Шилин А.А. Методика определения параметров динамической модели литий-ионного аккумулятора // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники – 2019 – Vol. 22 – No. 4 – С. 96-101.
- [22] Возмилов А.Г., Панишев С.А., Лисов А.А. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика – 2022 – Vol. 22 – No. 2 – С. 30-36.
- [23] Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю. Математическая модель аккумуляторной батареи с учетом физических ограничений на доступную мощность // Электрохимическая энергетика – 2023 – Vol. 23 – No. 3 – С. 121-133.

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF MATHEMATICAL MODELS OF LITHIUM-ION BATTERIES WITHIN ENERGY STORAGE SYSTEMS

H. H. Sh. Le Zha (sonsevas98@gmail.com)

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk

D. Z. Nguyen (nguyenzuy151099@gmail.com)

Black Sea Higher Naval Academy named P. S. Nakhimov, Sevastopol

F. N. Hoang (namhp0108@gmail.com)

Black Sea Higher Naval Academy named P. S. Nakhimov, Sevastopol

When assessing the states of a lithium-ion battery (LIB), the adequacy of its mathematical model significantly influences the accuracy of forecasting. In this study, an analysis of various mathematical models of LIBs was conducted, including the Shepherd model, Thevenin model, DP model, and electrochemical model. Each model was scrutinized for its characteristics in terms of alignment with experimental data. The analysis revealed that the electrochemical model emerged as the most precise in describing the internal processes of the battery. This is evidenced by its more accurate prediction of electrochemical reactions, charge/discharge dynamics, and consideration of degradation.

Keywords: lithium-ion battery, Shepherd model, Thevenin model, DP-model

УДК: 629.33

УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ АВТОМОБИЛЬНОГО АДСОРБЕРА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ

Н.А. Микерин (*nikita.mikerin@nami.ru*)
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва 125438,
Российская Федерация

Введение (постановка задачи и актуальность). Серийное производство автомобилей с подключаемой гибридной силовой установкой PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) налажено на большинстве ведущих автопроизводств. Такая концепция силовой установки позволяет автомобилю двигаться на электротяге длительное время. Аккумуляторная батарея может заряжаться как от внешнего источника, рекуперировать энергию торможения, и осуществлять зарядку батареи от двигателя внутреннего сгорания. Цель исследований – описать процессы, происходящие в паровом пространстве топливного бака. Методология и методы. Проанализирована генерация паров топлива в паровом пространстве топливного бака, где паровой объем постоянно сообщен с адсорбером. Проанализирована генерация паров топлива в паровом пространстве топливного бака, где паровой объем и адсорбер разделены клапаном изоляции топливного бака. Определено влияние изменения температуры, состава и количества топливовоздушной смеси в паровом пространстве на давление в топливном баке. Практическая значимость. Получены зависимости, которые позволяют определить массу паров в топливном баке в зависимости от температуры топлива и определение давления в закрытой системе вентиляции топливного бака при нагреве топлива.

Ключевые слова: система вентиляции топливного бака, бензин, адсорбер, PHEV, парциальное давление.

Введение

В современном мире с каждым годом расширяется производство автомобилей с комбинированными энергетическими установками. Среди них, можно отметить подключаемые гибридные автомобили – PHEV, серийное производство которых организовано большинством современных автопроизводителей. Главным отличием PHEV от стандартного гибридного автомобиля является наличие аккумуляторной батареи повышенной

емкости, что позволяет длительное время работать только на электроприводе с заглушенным ДВС (рис.1).

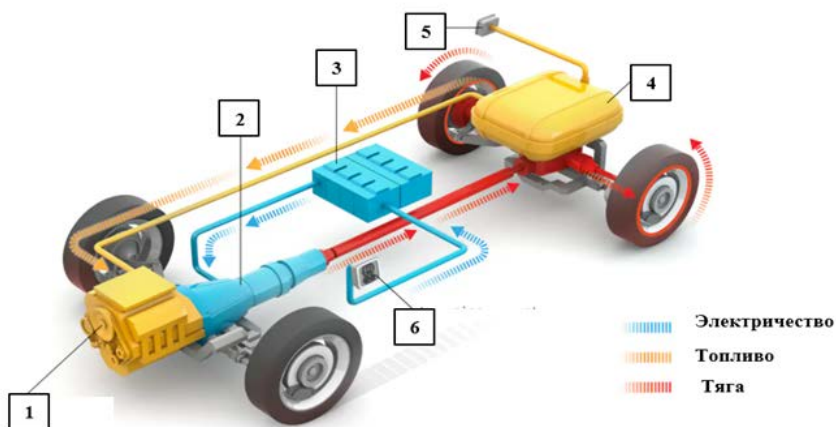


Рис. 1. Схема энергоустановки подключаемого гибридного автомобиля: 1 – ДВС; 2 – электродвигатель; 3 – батарея аккумуляторов; 4 – топливный бак; 5 – батарея аккумуляторов; 6 – разъем для зарядки

Зарядка аккумуляторной батареи PHEV может осуществляться; от внешнего источника, от ДВС (двигатель внутреннего сгорания); от рекуперации энергии торможения. Длительное функционирование автомобиля исключительно на электричестве особенно актуально для жителей больших городов с поездками на небольшие расстояния. Такое использование создает значительные перспективы роста спроса на подключаемые гибриды в обозримом будущем.

1. Система вентиляции топливного бака

В традиционной системе вентиляции топливного бака образующиеся в нем испарения беспрепятственно заполняют адсорбер (рис.2). Эта система является открытой. В системах с подключаемой силовой установкой, продувка адсорбера не производится если ДВС не запускается в течение длительного времени [1, 2]. Рано или поздно уголь в адсорбере перестает накапливать углеводороды, которые образуются в топливном баке. В связи с этим появляется риск выброса не адсорбированных углеводородов в атмосферу. Поэтому, исследования процессов генерации испарений и нахождения решений по их минимизации являются актуальными.

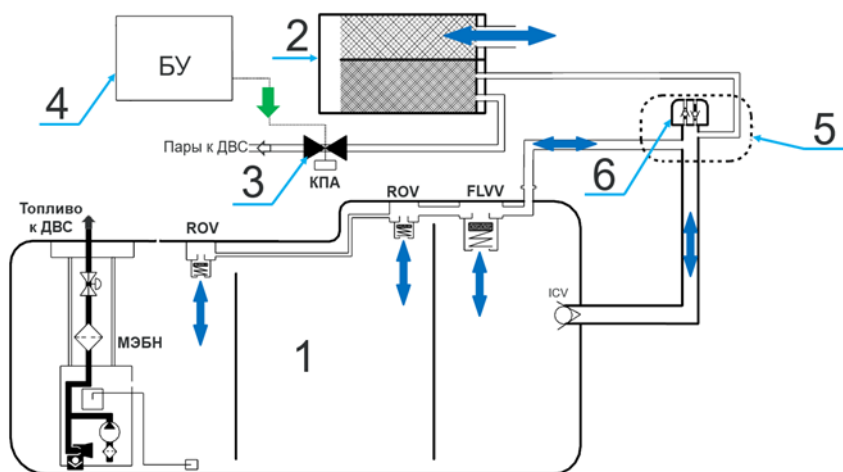


Рис. 2. Открытая система вентиляции: 1 – топливный бак; 2 – адсорбер; 3 – клапан продувки адсорбера; 4 – блок управления; 5 – лючок заправки; 6 – пробка топливного бака.

Основная функция системы улавливания топливных испарений – предотвращение попадания в атмосферу углеводородов, образовавшихся при нагреве топлива за счет дневного увеличения его температуры, что актуально и для подключаемых гибридов, и для традиционных автомобилей с ДВС.

В традиционных системах вентиляции паровое пространство топливного бака постоянно сообщено с адсорбером. Схема генерации топливных испарений с их выходом в атмосферу может быть представлена в виде пространства изменяемого объема, которое расширяется по мере испарения топлива с поддержанием постоянного давления смеси, равного атмосферному давлению ($V = var, p = pa = const$) [3, 4]. Процессы образования испарений и загрузки адсорбера совмещены и протекают одновременно. Процесс образования испарений является изобарным (рис 3).

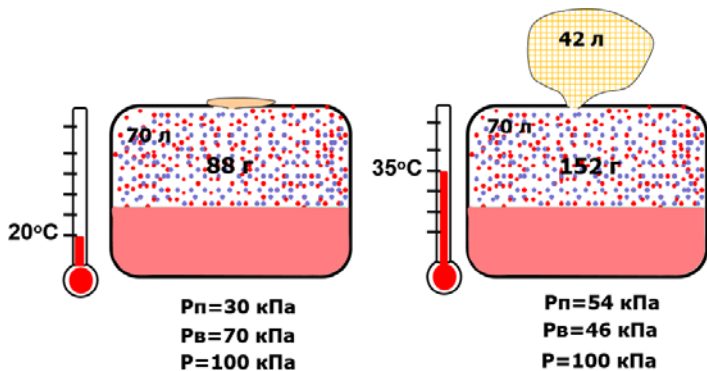


Рис. 3. Визуализация изобарного процесса испарений на примере топливного бака объемом 70 литров

Размещение в паропроводе, соединяющим бак с адсорбером, электромагнитного клапана изоляции топливного бака позволяет разделить процессы образования испарений и загрузки адсорбера (рис. 4). В случае, когда клапан закрыт процесс образования испарений может рассматриваться как изохорный.

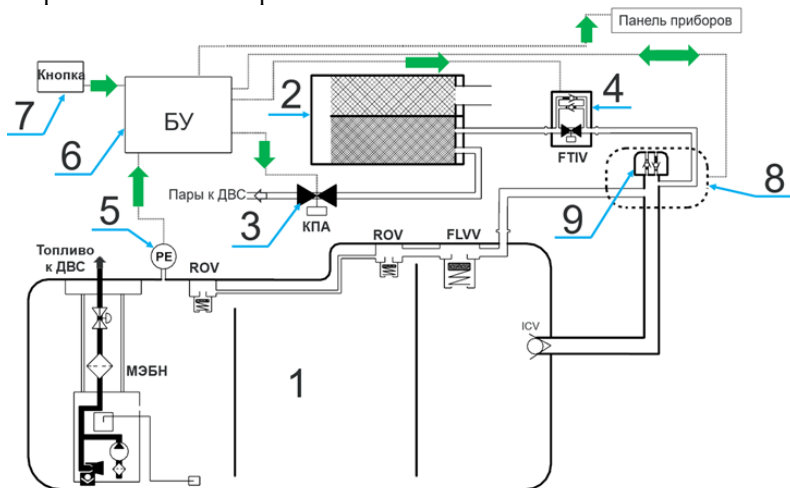


Рис. 4. Закрытая система улавливания испарений: 1 – топливный бак; 2 – адсорбер; 3 – клапан продувки адсорбера; 4 – запорный клапан бака (FTIV); 5 – датчик давления паров; 6 – блок управления; 7 – электронная кнопка открытия лючка бензобака в салоне; 8 – лючок бензобака; 9 – пробка бензобака

Массы паров топлива $M_{\text{п}}$, воздуха $M_{\text{в}}$ и их смеси M , содержащихся в паровом пространстве топливного бака V , можно определить с помощью уравнения состояния

$$M_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}V}{R_{\text{п}}T}; M_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}}V}{R_{\text{в}}T}; M = \frac{pV}{RT}, \quad (1)$$

где $p_{\text{п}}$ – парциальное давление паров топлива, кПа; $p_{\text{в}}$ – парциальное давление воздуха, кПа; p – давление смеси в паровом пространстве топливного бака, кПа; $R_{\text{п}} = 81$ Дж/кг·К – газовая постоянная паров топлива; $R_{\text{в}} = 287$ Дж/кг·К – газовая постоянная воздуха; R – газовая постоянная смеси; M – масса смеси, г; T – температура смеси, равная температуре топлива.

Относительное приращение массы углеводородов имеют одинаковый вид, что для постоянного объема парового пространства, что для изменяемого. Оно определяется дифференцированным уравнением процесса генерации паров (2). Различия заключаются в том, что при испарении с постоянным давлением смеси величина dV/V положительная, а при образовании испарений в замкнутом пространстве величина dV/V равна нулю, или при некоторых условиях даже может быть отрицательной. В связи с этим, образование испарений в замкнутом объеме значительно ниже, чем при постоянном давлении смеси.

$$\frac{dM_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} = \frac{dp_{\text{с}}}{p_{\text{с}}} + \frac{dV}{V} - \frac{dT}{T}. \quad (2)$$

Следовательно, в закрытой системе улавливания испарений можно выделить две основные фазы, на которые можно воздействовать. Первая фаза – генерация углеводородов, вторая – загрузки адсорбера.

На первую фазу можно воздействовать управлением подвода тепла к топливу, которое находится в топливном баке. Например, управление бензонасосами в зависимости от потребностей ДВС, экранирование топливного бака от горячих частей автомобиля.

Второй фазой, как было описано выше, можно управлять клапаном изоляции топливного бака. Осуществлять сброс паров с парового пространства в адсорбер по определенному алгоритму, для минимизации загрузки адсорбера.

2. Давление в паровом пространстве

При испарении топлива в замкнутом паровом пространстве происходит рост давления p , которое определяется суммой давлений насыщенных паров бензина $p_{\text{с}}$ и парциальным давлением воздуха $p_{\text{в}}$

$$p = p_{\text{с}} + p_{\text{в}}.$$

$$p_{\text{с}} = p_{\text{г}} \frac{t^2/2 + 300}{1000};$$

$$p_B = \frac{M_B R_B T}{V_{II}}$$

где, p_r – давление насыщенных паров по Рейду, t – температура топлива.

На рис. 5 показано изменение избыточного давления в зависимости от количества топлива в баке.

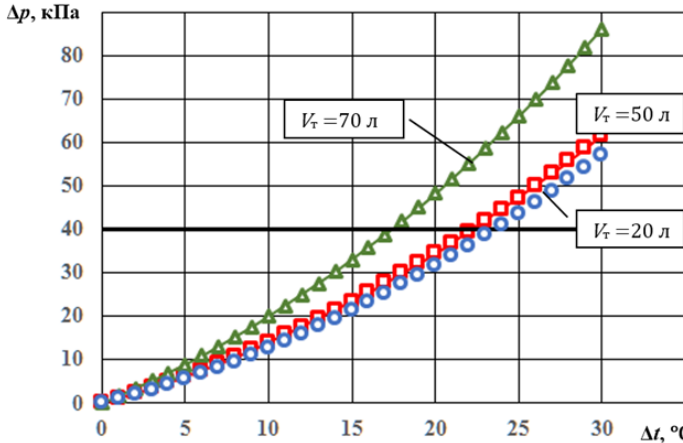


Рис. 5. Избыточное давление в баке ($p_r = 65$ кПа)

При заправленном объеме топливного бака больше, чем на 66% от геометрического объема, рост избыточного давления определяется увеличением давления насыщенных паров бензина и практически не зависит от теплового расширения топлива при нагреве (рис. 6).

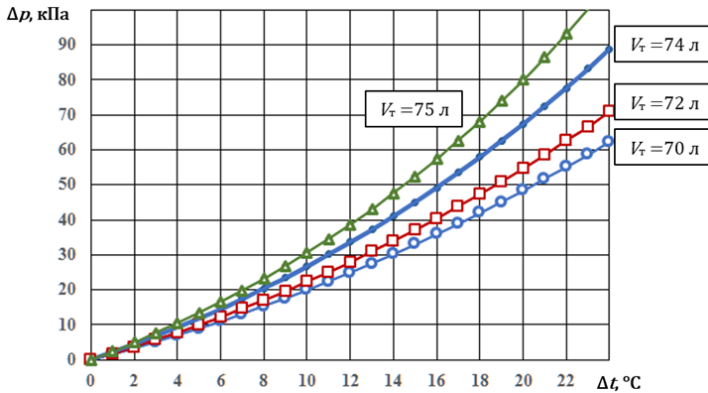


Рис. 6. Избыточное давление в полном баке

Величина максимального давления смеси в паровом пространстве зависит от количества топлива. Если бак заправлен меньше, чем на 66%, рост избыточного давления при нагреве определяется увеличением давления насыщенных паров бензина и практически не зависит от теплового расширения топлива. При заполнении бака на 90% и более тепловое расширение топлива оказывает значительное влияние на рост избыточного давления, максимальная величина которого достигается при температуре на 8...12 °С ниже, чем у бака, наполненного меньше, чем на две трети максимального объема.

Заключение

Углеводороды, которые образуются при нагреве топлива, имеют два состояния; газообразное состояние в паровом пространстве бака, связанные в адсорбере в состоянии адсорбата. Углеводороды в адсорбер поступают при открытии клапана изоляции топливного бака при достижении заданного максимального давления смеси. Снижение суммарной загрузки адсорбера при движении на электротяге и защиты окружающей среды от попадания углеводородов в атмосферу – цель оптимально процесса функционирования системы. Оптимальный процесс может быть обеспечен в замкнутой системе вентиляции.

Для оптимизации процесса функционирования системы улавливания топливных испарений необходимо обеспечить достижения максимального давления смеси при возможно большей температуре.

Заданная величина максимального давления смеси в паровом пространстве зависит от степени наполнения бака топливом. Если бак заправлен меньше, чем на две трети, рост избыточного давления при нагреве определяется увеличением давления насыщенных паров бензина и практически не зависит от теплового расширения топлива. При заполнении бака на 90% и более тепловое расширение топлива оказывает значительное влияние на рост избыточного давления, максимальная величина которого достигается при температуре на 8...12°С ниже, чем у бака, наполненного меньше, чем на две трети максимального объема.

Установлено, что процесс однократной загрузки адсорбера является изотермическим. Давление насыщенных паров при этом неизменно и соответствует температуре процесса в момент достижения максимального давления смеси. Масса паров в системе в ходе процесса неизменна, но перераспределяется между паровым пространством бака в газовой фазе и частично аккумулируется в адсорбере, принимая форму адсорбата.

Список литературы

- [1] Yojiro Iriyama, Masahide Kobayashi, Takuji Matsubara, Yuusaku Nishimura, Ryosuke Nomura and Takashi Ishikawa. Design of A Fuel Vapor containment System (FVS) to Meet Zero Evaporative Emissions Requirements in a Hybrid Electric Vehicle. SAE International, 2012.
- [2] Williamson, S.S. Energy management strategies for electric and plug-in hybrid electric vehicles, Springer Science, New York, 2013.
- [3] Тер-Мкртчян Г.Г. Анализ процессов парообразования в топливном баке автомобиля. Новое уравнение для определения количества испарений // Труды НАМИ. – 2021. – № 2 (285). – С. 58–70.
- [4] Тер-Мкртчян Г.Г. Менеджмент топливных испарений в автомобилях с бензиновыми двигателями: Учебное пособие. – М., ФГУП «НАМИ», 2022 – 190 с.
- [5] Reddy S. Understanding and Designing Automotive Evaporative Emission Control Systems // SAE Technical Paper. – 2012. – No. 2012-01-1700. DOI: 10.4271/2012-01-1700.
- [6] Тер-Мкртчян Г.Г., Микерин Н.А., Главизнин В.В., Цейтлин А.А., Мальшев А.Б., Тер-Мкртчян Ю.Г. Образование испарений в топливном баке автомобиля. Стратегия загрузки адсорбера // Труды НАМИ. – 2023. – № 2 (293). – С. 6–17. DOI: 10.51187/0135-3152-2023-2-6-17.
- [7] Zhang X., Su Y., H. Wu, Z. Z. “Optimization of the activated carbon adsorption process for automotive fuel vapor emissions control,” Journal of Cleaner Production, 2018, vol. 197, pp. 828-838.

CONTROL LOADING A CANISER FOR PHEV

N.A. Mikerin (*nikita.mikerin@nami.ru*)

Federal State Unitary Enterprise “Central Scientific Research
Automobile and Automotive Engines Institute”
(FSUE “NAMI”), Moscow 125438, Russian Federation

Introduction (problem statement and relevance). Currently, most automakers have organized mass production of vehicle with a plug-in hybrid powertrain - PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle). This solution allows you to drive only on electric power for a long time using a rechargeable battery, which can be charged from an external source and from an internal combustion engine (ICE), as well as recover energy from braking. In the future, the demand for PHEV will show significant growth, especially for large cities. When driving on electric power, the ICE may not work for a long time, so the canister will not be purged. In this regard, it is relevant to study the processes of evaporation generation and find solutions to minimize them.

The purpose of the research is to describe the processes occurring in the vapor space of the fuel tank.

Methodology and methods. The generation of fuel vapor in the vapor space of the fuel tank, where the vapor volume is constantly in communication with the canister, has been analyzed. The generation of fuel vapor in the vapor space of the fuel tank, where the vapor volume and the canister are separated by the fuel tank isolation valve, is analyzed. The influence of changes in temperature, composition and quantity of the air-fuel mixture in the vapor space on the pressure in the fuel tank is determined.

Practical significance. Dependencies were obtained that make it possible to determine the mass of vapors in the fuel tank depending on the fuel temperature and determine the pressure in the closed ventilation system of the fuel tank when the fuel is heated.

Keywords: EVAP system, gasoline, canister, PHEV, partial pressure.

УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛИ ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВИЭ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

И.Д. Георгиевский (*georgievskiy.id@gmail.com*)
НИУ «Московский энергетический институт», Москва

На протяжении последних лет объемы вводов генерирующего оборудования на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в мире превышают объемы вводов генерирующих мощностей на традиционных электростанциях. Во многих странах наблюдается существенный рост ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем. Данный тренд требует внедрения в энергосистемах дополнительных ресурсов для повышения гибкости, учитывая стохастический характер выработки электроэнергии ВЭС и СЭС. Применение систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) позволяет разнести во времени процесс производства и потребления электроэнергии, что является эффективным решением, позволяющим обеспечить управляемость режимами энергосистем при увеличении доли генерирующего оборудования на основе ВИЭ. В статье представлен международный и отечественный опыт применения СНЭЭ совместно с ВЭС и СЭС, в магистральных и распределительных сетях, а также в составе микросетей. Рассмотрены получаемые технические эффекты от внедрения СНЭЭ.

Ключевые слова: энергосистема, гибкость, возобновляемые источники энергии, система накопления энергии, регулирование частоты, регулирование напряжения, отсрочка инвестиций

Введение

Известно, что генерирующее оборудование на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), применяемое на ветровых и солнечных электростанциях (СЭС), не имеет гарантированной мощности и характеризуются высокой скоростью изменения активной мощности. Интеграция ВЭС и СЭС со стохастическим характером выработки электроэнергии требует поиска ресурсов для повышения гибкости энергосистем, поскольку повышается риск возникновения мгновенных

небалансов мощности и увеличивается скорость протекания переходных процессов. Основной целью управления режимами энергосистем с ВЭС и СЭС является смягчение колебаний параметров режима и получение наибольшей выработки электроэнергии от объектов на основе ВИЭ. Эти задачи могут быть решены с помощью систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), которые открывают новые возможности за счет способности разделять во времени процесс производства и потребления электроэнергии [Илюшин и др., 2024].

Благодаря высоким динамическим характеристикам элементов силовой электроники СНЭЭ можно эффективно использовать для оперативной компенсации небаланса мощности в энергосистеме, уменьшая при этом количество пусков и остановов генерирующего оборудования на традиционных электростанциях. СНЭЭ имеют широкий регулировочный диапазон около 200% установленной мощности, в силу возможности работы не только в режиме выдачи, но и в режиме потребления мощности. Однако СНЭЭ имеют существенный недостаток, создающий барьер для их участия в оказании системных услуг, обусловленный ограниченной энергоемкостью, которая лимитирует возможность выдачи мощности по времени [Илюшин и др., 2019].

В статье будут рассмотрены варианты применения СНЭЭ, с учетом мест их размещения в энергосистеме:

- в составе ВЭС и СЭС;
- в магистральных электрических сетях напряжением 220 кВ и выше;
- в распределительных сетях напряжением до 110 кВ;
- в составе микросетей.

1. СНЭЭ в составе ВЭС и СЭС

Включение СНЭЭ в состав ВЭС и СЭС позволяет накапливать избыточные объемы электроэнергии, производимые ими в периоды пиковой выработки, с целью ее выдачи в другие часы. Такой подход позволяет иметь гарантированную мощность и стабилизировать выработку электроэнергии ВЭС (СЭС). Это открывает возможности для участия ВЭС (СЭС) в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) в энергосистеме при ее снижении. Кроме того СНЭЭ позволяет работать ВЭС (СЭС) по фактическому приходу ветровой/солнечной энергии без ограничений на выдачу мощности в энергосистему, что особенно важно с точки зрения экономической эффективности проектов.

Применение на ВЭС (СЭС) устройств силовой преобразовательной техники, имеющих малую постоянную инерции, содействует снижению общей постоянной инерции в энергосистеме. Если совокупность непрогнозируемых отклонений мощности в энергосистеме превышает предельно-допустимое значение, необходимо снизить величину мощности,

выдаваемой ВЭС (СЭС) или заменить её другими источниками электроэнергии. Работа СНЭЭ в режиме заряда/разряда в этом случае позволяет компенсировать стохастический характер выработки ВЭС (СЭС). Примером успешной применения этого подхода служит проект, реализованный во Франции на острове Ла-Реюньон, где была установлена СНЭЭ с аккумуляторной батареей (АБ) энергоёмкостью 9 МВт·ч в составе СЭС установленной мощностью 9 МВт [IRENA, 2020]. На рис. 1 показано, как АБ сглаживает профиль выработки СЭС, в соответствии с требованиями по обеспечения точного и плавного утреннего увеличения мощности СЭС, поддержания стабильного профиля в течение дневных часов работы и обеспечения равномерного снижения в вечернее время.

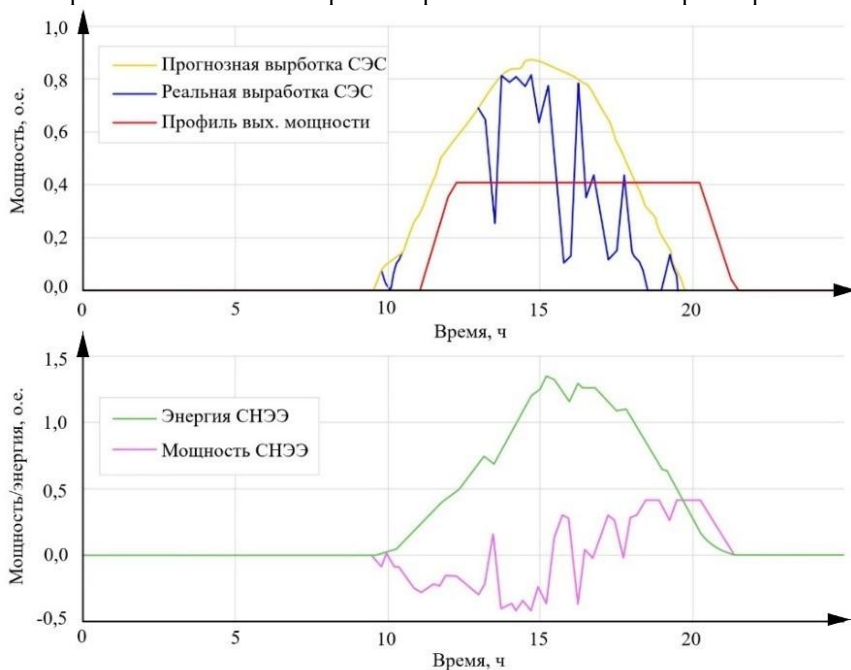


Рис. 1. График выработки электроэнергии СЭС на острове Ла-Реюньон с СНЭЭ энергоёмкостью 9 МВт·ч

Применение СНЭЭ в составе ВЭС (СЭС) позволяет также обеспечить гарантированную выработку электроэнергии по заданному диспетчерскому графику. Такой способ управления СНЭЭ требует прогнозирования производства электроэнергии ВЭС (СЭС) на сутки вперед (основан на процедурах прогнозирования погоды), с учетом прогнозных объемов выработки при формировании диспетчерского графика для всех

электростанций в составе энергосистемы. При отклонении величины выработки ВЭС (СЭС) от планируемого диспетчерского графика СНЭЭ временно заменяет их выработку, тем самым компенсируя ошибки краткосрочного прогноза (до 24 ч.) и косвенно улучшая его точность.

Оба представленных алгоритма управления СНЭЭ могут быть реализованы совместно в системе автоматического управления (САУ). Первый алгоритм позволяет устранить значительные изменения мощности, работая в диапазоне не более 30% от энергоемкости СНЭЭ. Второй алгоритм управления СНЭЭ позволяет замещать выработку ВЭС (СЭС) в течение нескольких часов, в соответствии с диспетчерским графиком, разряжая АБ СНЭЭ в диапазоне от 100% заряда до 10%.

2. СНЭЭ в магистральных электрических сетях напряжением 220 кВ и выше

Для обеспечения устойчивости энергосистем требуется, чтобы производство электроэнергии всегда соответствовало величине спроса. Отклонения частоты от её номинального значения свидетельствуют о несоответствии между выработкой и потреблением электроэнергии. В первые моменты возникновения дефицита/избытка мощности скорость изменения частоты замедляется за счет инерции синхронных генераторов традиционных электростанций, а затем, действием автоматических регуляторов частоты вращения генерирующего оборудования восстанавливается до нормируемой величины.

Благодаря высокому быстродействию (доли секунды) СНЭЭ способны удовлетворять требованиям к регулированию частоты, установленным в ЕЭС России [6] и обеспечивать более оперативный отклик, чем энергоблоки традиционных электростанций. Данные виды услуг также доступны для распределительных сетей напряжением до 110 кВ.

Примером применения СНЭЭ для регулирования частоты служит проект Hornsdale Power Reserve компании Tesla в Австралии. Мощность литий-ионных АБ составляет 100 МВт, а энергоемкость 129 МА·ч, что эквивалентно полной разрядке СНЭЭ за время около 75 мин. В августе 2018 г. в результате удара молнии в воздушную линию электропередачи (ЛЭП) произошло отключение всех межсистемных ЛЭП между штатом Южная Австралия и другими регионами. Отклик СНЭЭ на аварийный дефицит мощности составил 0,1 с, что позволило предотвратить отключение потребителей. Применение СНЭЭ позволило значительно снизить цены на услуги по регулированию частоты в Южной Австралии с 500 тыс. долларов США в декабре 2016 г. до 40 тыс. долларов США в декабре 2017 г.

Подключение СНЭЭ на дальних концах перегруженных магистральных ЛЭП позволяет отсрочить крупные единовременные инвестиции в увеличение их пропускной способности на несколько лет и даже полностью

исключить их. Это особенно актуально в тех случаях, когда пиковые нагрузки на ЛЭП возникают всего несколько дней в году, а также если в магистральных сетях интегрированы большие объемы ВЭС (СЭС). На рис. 2 приведен пример использования СНЭЭ для отсрочки инвестиций в увеличение пропускной способности ЛЭП величиной 300 МВт.

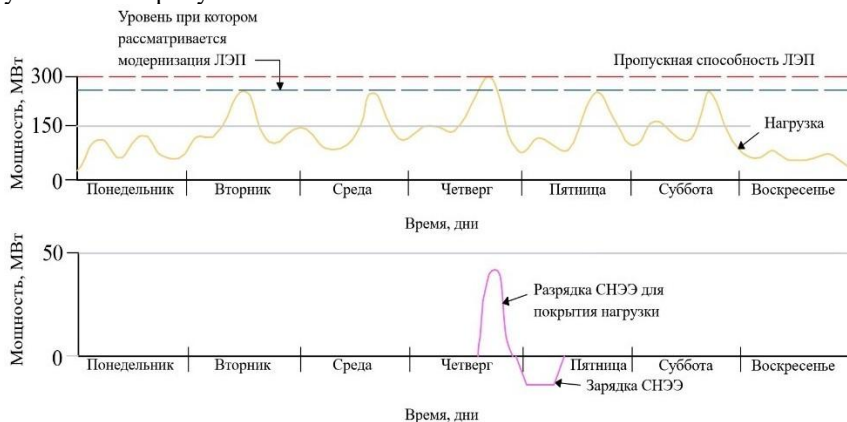


Рис. 2. Графики загрузки ЛЭП и заряда/разряда СНЭЭ

На нижнем графике показано, что СНЭЭ разряжается в четверг днем для покрытия графика нагрузки подстанции. В этом случае СНЭЭ заряжается в ночь на пятницу, когда нагрузка ЛЭП значительно снижается.

3. СНЭЭ в распределительных сетях напряжением до 110 кВ

Стохастический характер выработки электроэнергии ВЭС (СЭС) также оказывает влияние на режимы работы распределительной сети. Колебания мощности могут приводить к ухудшению показателей качества электроэнергии, в том числе, значительных флуктуациях напряжения и тока, возникновении гармонических составляющих и др. [Илюшин, 2013].

Подключение СНЭЭ к распределительным сетям содействует поддержанию показателей качества электроэнергии в соответствии с требованиями, повышения надежности электроснабжения потребителей, отсрочки инвестиций в увеличение пропускной способности ЛЭП, а также поддержки интеграции ВЭС (СЭС) в распределительные сети.

Размещение СНЭЭ в центрах питания (ЦП) позволяет удовлетворить спрос на электроэнергию в периоды максимальных нагрузок, тем самым разгружая питающие ЛЭП. Во многих крупных городах России существует проблема закрытых ЦП, когда увеличение присоединяемой мощности на подстанциях невозможно без увеличения мощности силовых трансформаторов (СТ) или пропускной способности ЛЭП, с учетом ранее

принятых обязательств по обеспечению надежности и качества электроснабжения для потребителей электроэнергии [Илюшин, 2022]. Одной из основных причин закрытия ЦП является недопустимая величина перегрузки СТ. Известно, что СТ допускают систематические перегрузки в отдельные часы работы в течение суток, при условии недогрузки в другие часы [Гусев и др., 2019].

В период времени, когда СТ на подстанции недогружен, есть возможность зарядить СНЭЭ, подключенную к шинам низшего напряжения подстанции, с увеличением коэффициента загрузки СТ до единицы. В периоды утренних и вечерних максимумов нагрузки разряд СНЭЭ позволяет обеспечить покрытие графика нагрузки, не допуская при этом недопустимую перегрузку СТ [Илюшин, 2016].

Размещение СНЭЭ в ЦП способствует отсрочке строительства нового и реконструкции существующего оборудования распределительных сетей в условиях роста мощности присоединяемых к ЦП потребителей, обеспечивая качественное и устойчивое электроснабжение, предотвращая недопустимые перегрузки ЛЭП и СТ, что увеличивает их долговечность.

В исследовании [Климов, 2023] проведен анализ модели участка распределительной сети напряжением 10 кВ в г. Москве, который указывает на целесообразность размещения СНЭЭ на трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ с высоким коэффициентом загрузки ($K_{\text{загр}}$) СТ. Установка СНЭЭ мощностью 100 кВт и энергоемкостью 938,7 кВт·ч на ТП 10/0,4 кВ с $K_{\text{загр}} = 0,84$ привела к увеличению доступной мощности в 26,32 раза, в то время как установка СНЭЭ на ТП 10/0,4 кВ с $K_{\text{загр}} = 0,38$ не привела к значительным изменениям.

Установка СНЭЭ в узлах нагрузки позволяет существенно влиять на улучшение показателей качества электроэнергии, благодаря их способности регулировать как активную, так и реактивную мощность. Этот подход снижает необходимость установки самостоятельного оборудования для компенсации реактивной мощности и может рассматриваться в качестве дополнительной услуги к основному назначению СНЭЭ. Как правило для такого применения необходимы СНЭЭ мощностью 0,1-10 МВА, энергоемкостью рассчитанной на непрерывный разряд продолжительностью от нескольких секунд до 10-и мин. и не менее 10-200 циклов работы в год [Илюшин и др., 2019].

В [10] приведены результаты анализа участка распределительной сети с кольцевой схемой электроснабжения напряжением 10 кВ. Результаты показали, что выбор параметров (мощности, энергоемкости) и места размещения СНЭЭ в распределительной сети необходимо производить посредством поиска варианта, при котором поддержание заданного суточного графика напряжения в наиболее «проблемном» узле сети максимально улучшит ситуацию с уровнями напряжения во всей сети.

4. СНЭЭ в составе микросетей

В последние годы мировая электроэнергетика развивается в сторону создания интеллектуальных систем электроснабжения (микросетей), поощряя инициативу потребителей развивать собственные распределенные источники электроэнергии на основе ВИЭ и напрямую взаимодействовать с энергосистемой. Как правило в микросети объединяются домохозяйства и малые предприятия, стремящиеся сократить расходы на приобретение электроэнергии, в том числе за счет реализации излишков выработки электроэнергии, а также уменьшить зависимость от традиционных источников энергии. СЭС, в силу их более удобного монтажа, экономии земельного участка и относительной низкой стоимости получили наиболее широкое распространение в микросетях [NREL, 2021].

Создание сетевых СЭС, выдающих излишки электроэнергии в распределительную сеть, зачастую имеют меньшую эффективность из-за переменного характера выработки мощности. В энергорайонах с высоким уровнем внедрения СЭС сталкиваются с необходимостью компенсации стохастического характера выработки электроэнергии. В этом случае максимизация потребления электроэнергии, вырабатываемой собственной СЭС, а также минимизация экспорта ее излишков в энергосистему является более предпочтительным режимом работы.

Применение СНЭЭ в составе микросетей позволяет увеличить долю СЭС за счет максимизации собственного потребления производимой в микросети электроэнергии, что позволяет потребителям сократить расходы на электроснабжение. Установка СНЭЭ «за счетчиком» позволяет оказывать максимальное количество услуг, в том числе участие в регулировании напряжения и частоты в энергосистеме, отсрочку инвестиций в увеличение пропускной способности ЛЭП и СТ в распределительных сетях, а также в строительство пиковых генерирующих мощностей в энергосистемах [IRENA, 2019].

Применение СНЭЭ в составе микросетей активизируется по всему миру. Мировым лидером в области применения СНЭЭ «за счетчиком» является Австралия, где в 2022 г. были реализованы проекты по установке бытовых СНЭЭ общей энергоемкостью 589 МВт·ч. Суммарной установленная мощность бытовых СНЭЭ на текущий момент приближается к 2 ГВт. В Германии на конец 2022 г. суммарная установленная мощность/энергоемкость бытовых СНЭЭ составляла 1,2 ГВт/1,9 ГВт·ч соответственно, что на 52% больше аналогичных показателей за 2021 г.

Для предоставления системных услуг со стороны СНЭЭ «за счетчиком» эффективно их объединение в виртуальную электростанцию, имеющей единую САУ. Это позволяет организовать гибкую и управляемую сеть

СНЭЭ, эффективно участвующую в процессах производства и потребления электроэнергии по командам диспетчера энергосистемы. Организацией, объединением и представительством большого количества бытовых СНЭЭ на рынке электроэнергии и мощности может заниматься специализированный участник рынка, называемый агрегатором. Благодаря наличию САУ, реализующей функции мониторинга и управления отдельными бытовыми СНЭЭ у их частных владельцев появляется реальная возможность для активного участия в управлении режимами энергосистем, аналогично традиционным электростанциям.

На текущий момент в Германии функционирует самая крупная в Европе виртуальная электростанция, принадлежащая компании Sonnen. Виртуальная электростанция обеспечивает управление большим количеством СНЭЭ, принадлежащих частным домохозяйствам и АБ электромобилей. Суммарная энергоемкость СНЭЭ составляет 250 МВт·ч, что позволяет предоставлять услуги по сглаживанию кратковременных колебаний частоты в энергосистеме системному оператору TenneT.

Заключение

Увеличение доли ВЭС и СЭС в составе энергосистем требует внедрения компенсационных мер по повышению их гибкости. СНЭЭ, способные аккумулировать и быстро выдавать накопленную электроэнергию, рассматриваются как одно из эффективных решений проблемы интеграции генерирующего оборудования на основе ВИЭ в энергосистемы.

Мировой опыт показывает, что СНЭЭ, предоставляя широкий спектр услуг энергосистемам, обеспечивают повышение их гибкости за счет расширения возможностей по управлению процессами производства и потребления электроэнергии. Недостаточно развитая нормативно-техническая и нормативно-правовая база в России затрудняет процесс массового внедрения СНЭЭ как электросетевыми компаниями, так и частными домохозяйствами, а также создает неопределенность в определении условий и механизмов их применения.

В статье рассмотрены возможные варианты эффективного применения СНЭЭ в составе ВЭС и СЭС, магистральных и распределительных сетей, а также в микросетях и перечислены виды услуг, предоставляемые СНЭЭ.

Внедрение СНЭЭ в энергосистемах России с высокой долей ВЭС (СЭС) позволит обеспечить управляемость их режимами без необходимости строительства пиковых генерирующих мощностей на традиционных электростанциях, а также отсрочить проведение реконструкции электросетевых объектов, что крайне актуально в современных условиях.

Список литературы

- [1] Гусев Ю.П. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях / Ю. П. Гусев, П. В. Субботин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. № 2.
- [2] Илюшин П.В. Выбор управляющих воздействий противоаварийной автоматики в распределительных сетях для повышения надежности электроснабжения потребителей / П. В. Илюшин // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 3 (12).
- [3] Илюшин П.В. Особенности противоаварийного управления при аварийных дефицитах мощности в автономных энергосистемах/ П. В. Илюшин // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 5.
- [4] Илюшин П.В., Березовский П.К. Подходы к формированию технических требований по участию объектов распределённой генерации в регулировании напряжения в энергосистеме / П. В. Илюшин, П. К. Березовский // Энергетик. 2019. № 3.
- [4] Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты / П. В. Илюшин, А. Л. Куликов, П. К. Березовский // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 4 (37).
- [5] Илюшин П.В. Анализ международного опыта формирования условий для эффективного применения систем накопления электроэнергии в управлении режимами / П. В. Илюшин, П. К. Березовский // Энергетик. 2019. № 11.
- [6] Илюшин П.В. Методы повышения маневренности электростанций при увеличении доли ветровых и солнечных электростанций в составе региональных энергосистем. Обзор / П. В. Илюшин, И. Д. Георгиевский // Электрические станции. 2024. № 3(1112).
- [7] Илюшин П. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии / П. В. Илюшин // Электроэнергия. Передача и распределение. 2022. № 6(75).
- [8] Климов П.Л. Влияние распределенной генерации с ветроэнергетическими установками на распределительные сети / П.Л. Климов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 2(121).
- [9] IRENA. Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability. 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_Storage_valuation_2020.pdf (дата обращения 08.01.2024).
- [10] IRENA. Innovation Landscape Brief: Behind-the-meter battery storage 2019. [Электронный ресурс]. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_BTMBatteries_2019.pdf (дата обращения 30.03.2024).
- [11] NREL. Behind-The-Meter Battery Energy Storage: Frequently Asked Questions. 2021. [Электронный ресурс]. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79393.pdf>

INCREASING THE SHARE OF RENEWABLE ENERGY-BASED GENERATING EQUIPMENT IN POWER SYSTEMS DUE TO APPLICATION OF ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

I.D. Georgievskiy (*georgievskiy.id@gmail.com*)
NRU "Moscow Power Engineering Institute", Moscow

In recent years, the volume of commissioning of generating equipment based on renewable energy sources (RES) in the world exceeds the volume of commissioning of generating capacities at conventional power plants. In many countries, there is a significant increase in wind (WPP) and photovoltaic (PPS) power plants in the structure of generating capacities of power systems. This trend requires the introduction of additional resources in energy systems to increase flexibility, taking into account the stochastic nature of power generation by WPP and PPS. The use of energy storage systems (ESS) allows you to time the process of production and consumption of electricity, which is an effective solution that allows you to ensure controllability of power systems with an increase in the share of renewable energy-based generating equipment. The article presents international and domestic experience in the use of ESS in conjunction with WPP and PPS, in trunk and distribution networks, as well as part of microgrids. The resulting technical effects from the introduction of ESS are considered.

Keywords: power system, flexibility, renewable energy sources, energy storage system, frequency regulation, voltage regulation, deferred investment

УДК: 621.311

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ МЕТОДОМ АРГ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

А.А. Зеленских (*zelenskihaleksandr7@gmail.com*)

В.М. Левин (*levin@corp.nstu.ru*)

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет», Новосибирск

Предложен подход к совершенствованию и унификации моделей принятия решений по безаварийной эксплуатации силовых трансформаторов. Обработка данных протоколов анализа растворенных газов (АРГ) в масле производится с применением методов теории вероятностей и математической статистики. Формирование правил принятия решений выполняется с использованием аппарата нечеткого логического вывода. Получена универсальная комбинированная модель на основе статистического байесовского классификатора и моделей нечеткого логического вывода, упрощающая выдачу заключения о фактическом состоянии трансформатора и рекомендацию необходимых эксплуатационных воздействий.

Ключевые слова: анализ растворенных газов, байесовский классификатор, нечеткий логический вывод, эксплуатационное воздействие, модели принятия решений

Введение

Высоковольтные силовые трансформаторы (СТ) в составе ответственных энергетических объектов (электростанций и электрических сетей) представляют один из важнейших видов производственных активов. Их надежная и безопасная работа является необходимым условием надежного электроснабжения конечных потребителей. В связи с этим, задачи по обеспечению безаварийной эксплуатации СТ весьма актуальны и имеют высокий приоритет в иерархии задач управления производственными активами энергокомпаний [Yu. Viçen et al., 2023].

Очевидно, что безопасную и надежную эксплуатацию СТ в ЭЭС возможно реализовать только с применением эффективной системы

диагностики, позволяющей выявлять опасные дефекты оборудования на ранних стадиях развития и своевременно формировать заключения о его техническом состоянии, а также обоснованные рекомендации о виде корректирующих воздействий для устранения неисправностей [Щербатов, 2023; Берман и др., 2015]. Логическую и вычислительную основу систем поддержки принятий решений (СППР) составляют диагностические модели и алгоритмы оперативной (предиктивной) оценки технического состояния оборудования [Федотов и др., 2021]. Модели различаются математическими методами описания признаков и критериев оценки, сбора и обработки диагностических данных по СТ, количеством учитываемых эксплуатационных факторов. Из общего множества можно выделить две группы моделей, области применения которых определены спецификой решаемых задач. К первой группе относят модели классификации. Как правило, речь идет о разделении классов состояний СТ, для которых принципиально важен ответ на вопрос – допустима ли его дальнейшая эксплуатация без ограничений или нет. Указанные модели включают формализованное описание признаков в пространстве классов состояний и классификатор, обеспечивающий высокую достоверность диагностических оценок.

Существует ограниченный набор методов мониторинга и диагностирования СТ, обеспечивающих первичные данные в соответствии с требованиями решаемых задач. Прежде всего, речь идет об индикативных методах раннего обнаружения дефектов в трансформаторе без вывода его из работы, среди которых анализу растворенных газов (АРГ) в масле СТ по праву принадлежит лидерство. Метод базируется на измерении концентраций диагностических газов таких как водород (H_2), метан (CH_4), этан (C_2H_6), этилен (C_2H_4), ацетилен (C_2H_2), оксид (CO) и диоксид углерода (CO_2), выделяемых из проб трансформаторного масла. Обученные на основе данных АРГ модели и алгоритмы адаптируют результаты классификации к вновь возникающим диагностическим данным, что является весьма продуктивным, однако, все же лишены универсальности и требуют индивидуальной настройки в условиях неполноты и нечеткости данных.

Ко второй группе моделей относят модели принятия решений, отражающие однозначную взаимную связь выявляемого класса состояния СТ с адекватным ему видом эксплуатационного воздействия. Последнее направлено на снижение вероятности отказа СТ и исключение связанных с ним нежелательных последствий. Поэтому его своевременное введение не только повышает надежность СТ, но и обеспечивает экономичность эксплуатации в составе ответственного энергообъекта.

Таким образом, **цель исследования:** совершенствование и унификация моделей формирования эффективных СППР по безаварийной эксплуатации

СТ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. анализ модели классификации состояний СТ на основе статистической теории распознавания образов;
2. выбор дополнительных компонентов из единого информационного поля протоколов АРГ для формирования обобщенного признака;
3. разработка универсальной комбинированной модели с применением статистического байесовского классификатора и моделей нечеткого логического вывода для формирования заключений по обоснованному выбору эксплуатационных воздействий, адекватных идентифицированному состоянию электрооборудования.

1. Модель классификации дефектов

Эффективным инструментом построения классификатора является метод статистической (байесовской) идентификации дефектов в СТ по данным АРГ [Левин, 2013]. В основу метода положено использование однородной статистики протоколов АРГ для формирования пространства исходных признаков, редукции его размерности с целью упрощения описания и улучшения статистических свойств распределений, построения дихотомии классов состояния СТ $C = \{C_1, C_2\}$, где C_1 – бездефектное состояние («норма») и C_2 – дефектное состояние («отклонения от нормы»). Статистический байесовский классификатор, использующий отношение правдоподобия, априори обеспечивает высокий (до 98%) уровень достоверности результатов диагностической оценки с возможностью адаптации к изменениям важных эксплуатационных факторов, например, таких как загрузка СТ.

Редукция пространства исходных признаков обеспечивается переводом многомерного пространства концентраций диагностических газов A_i на числовую ось обобщенного признака:

$$G = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A_{\text{тп}i}} \right)^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A_{\text{тп}i}} \right)^{-1} \in [0; +\infty), \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad (1.1)$$

для которого создается обучающая (тестовая) выборка, определяются ее числовые и интегральные характеристики, формируется критериальное решающее правило вида:

$$\begin{cases} G \leq G_{\text{тп}}^I \\ G > G_{\text{тп}}^I \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{класс } C_1; \\ \text{класс } C_2. \end{cases} \quad (1.2)$$

Здесь $G_{\text{тп}}^I$ представляет собой границу раздела классов состояний СТ, определяемую статистически по значениям числовых характеристик

случайных распределений признака G в каждом из классов состояний C_1 и C_2 (рис.1).

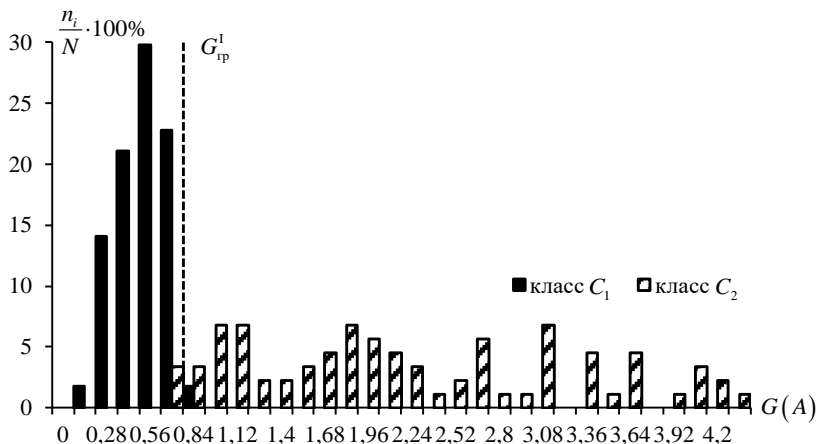


Рис.1. Определение граничного значения признака G

Исследования [Левин и др., 2023] подтверждают, что случайные величины G подчинены одному из двухпараметрических законов распределения (нормальному, логнормальному, гамма, Вейбулла). Тогда, для расчета $G_{гр}^I$ справедливо выражение:

$$G_{гр}^I = \frac{\tilde{M}_1 \cdot \tilde{\sigma}_2^2 - \tilde{M}_2 \cdot \tilde{\sigma}_1^2 \pm \sqrt{D}}{\tilde{\sigma}_2^2 - \tilde{\sigma}_1^2} \approx \tilde{M}_1 + k \cdot \tilde{\sigma}_1, \quad (1.3)$$

где: \tilde{M}_1 , $\tilde{\sigma}_1$ и \tilde{M}_2 , $\tilde{\sigma}_2$ – математические ожидания и среднеквадратические отклонения функции (1.1) в классах C_1 и C_2 соответственно; D – дискриминант квадратного уравнения; k – вычислительная константа, выбираемая эмпирически из интервала $2 \div 3$.

В большинстве случаев признак G целесообразно задать как многоразрядный. Это позволит детальнее представить подмножество C_2 дефектных состояний СТ. Как показывают исследования C_2 состоит из двух подмножеств C_{21} – «незначительные отклонения от нормы» и C_{22} – «значительные (критические) отклонения от нормы». В этом случае граница раздела дихотомии классов $C_2 = \{C_{21}, C_{22}\}$ может быть определена, например по (1.4) с применением соответственно значений \tilde{M}_2 , $\tilde{\sigma}_2$:

$$G_{гр}^{II} \approx \tilde{M}_2 + k \cdot \tilde{\sigma}_2. \quad (1.4)$$

Тогда, решающее правило выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} G \leq G_{\text{гр}}^{\text{п}} \subseteq \text{класс } C_{21}; \\ G > G_{\text{гр}}^{\text{п}} \subseteq \text{класс } C_{22}. \end{cases} \quad (1.5)$$

Для выработки решения о виде корректирующего воздействия на СТ по критериям (1.2) или (1.5) на основе АРГ критические недостаточно информации, уточняющей степень опасности выявленного дефекта и возможные последствия развития деструктивных процессов в трансформаторе. В связи с этим допускается увеличение количества компонент обобщенного признака из единого информационного поля, коим является выборка протоколов АРГ. В качестве дополнительных компонент могут быть приняты максимум относительной скорости нарастания концентраций растворенных в масле диагностических газов $\max\{V_{\text{отн}i}\}$, [%мес.], а также отношение концентраций диоксида и оксида углерода CO_2/CO , [о.е.]. По каждой из дополнительных компонент нормативно [РД, 2001] заданы границы допустимых и предельно допустимых значений, фиксирующие принадлежность состояния СТ к одному из исследуемых классов. Использование в модели классификации состояний СТ по АРГ трёхкомпонентного обобщенного признака $\mathbf{X} = [G, \max\{V_{\text{отн}i}\}, \text{CO}_2/\text{CO}]$ задает координаты вектора входных переменных для модели принятия решений по видам корректирующего воздействия на СТ и определяет допустимые интервалы изменения каждой из компонент.

2. Модель принятия решений по эксплуатации СТ

2.1. Нечеткие интервалы и функции принадлежности

Исследование базируется на применении фундаментального понятия «нечеткое множество». Подход к его формализации состоит в обобщении понятия принадлежности [Борисов и др., 2012]. В классической теории характеристическая функция служит одним из способов задания множества. Формирование модели принятия решений о выводе СТ в ремонт по фактическому состоянию с применением аппарата теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода может быть представлено следующим образом.

Пусть $\mathbf{X} = [G, \max\{V_{\text{отн}i}\}, \text{CO}_2/\text{CO}]$ – вектор входных контролируемых признаков x_j , характеризующих состояние СТ по методу АРГ. Областью определения $D(x_j)$ входных параметров модели служит бесконечное множество точек на оси действительных чисел $x \in [0; +\infty)$. Прежде всего следует задать лингвистическую переменную «Уровень параметра» с соответствующим обозначением терм $D(x_{ji})$ множества $D(x_j)$: «Низкий», «Средний», «Высокий». В качестве выходного параметра модели y задается лингвистическая переменная «Состояние СТ», либо «Риск отказа» $D(y_i)$.

Соответствие между уровнями лингвистической переменной y и адекватным эксплуатационным воздействием отражает табл. 1.

Табл. 1. Уровни выходной лингвистической переменной и соответствующие им экспертные решения

«Состояние СТ»	«Риск отказа»	Решение по эксплуатации СТ
Норма	Несущественный	Эксплуатация без ограничений
Норма с незначительными отклонениями	Низкий	Учащенный контроль
Норма со значительными отклонениями	Средний	Дополнительные обследования
Ухудшенное	Высокий	Эксплуатация с ограничениями
Предельное	Наивысший	Немедленный вывод из работы

Переменные входного вектора $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]$, а также входная переменная y имеют свои нечеткие интервалы для каждого из термов лингвистической переменной и соответствующие им функции принадлежности $\mu(x_j)$. Разбиение на интервалы переменных x_1, x_2 и x_3 при построении функций проводилось следующим образом: границы признака $x_1 = G$ определялись статистически с использованием байесовского классификатора и правила трех сигм. Границы $x_2 = \max\{V_{отнi}\}$ и $x_3 = CO_2/CO$ определялись на основе экспертных данных и нормативного документа [РД, 2001]. Вид нечетких интервалов входного вектора \mathbf{X} и выходной переменной y представлен на рис.2.

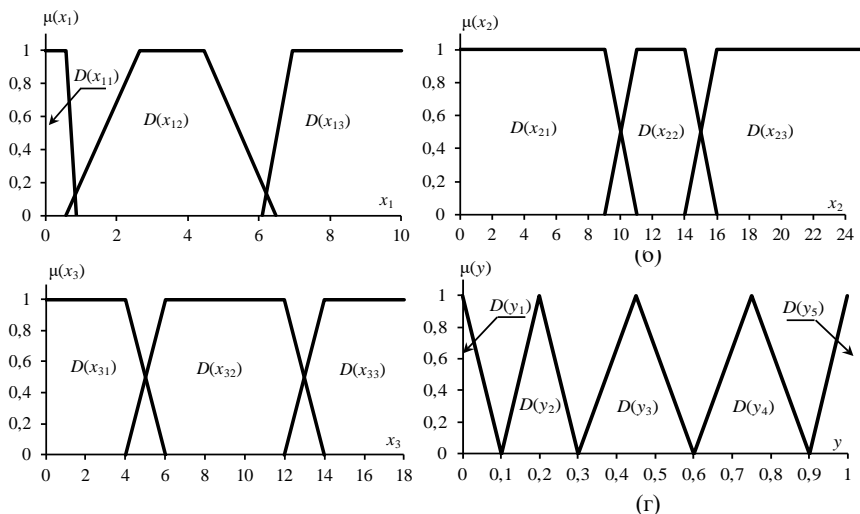


Рис.2. Функции принадлежности признаков: (а) – x_1 , (б) – x_2 , (в) – x_3 и (г) – y

При формировании правил принятия решений в условиях неопределенности данных, важно учитывать алгоритмы нечеткого вывода. В исследовании применяется наиболее популярный в технических задачах алгоритм Мамдани, который состоит из основных семи этапов: формирование базы правил, фаззификация входных параметров, агрегирование, активизация подзаклучений в нечетких правилах продукций, аккумуляция и дефаззификация. Дефаззификация необходима для приведения к четкости выходной лингвистической переменной y с использованием формулы «центра тяжести» [Борисов и др., 2012]:

$$y_R = \left(\int_{\min\{y\}}^{\max\{y\}} \mu(y) dy \right)^{-1} \cdot \int_{\min\{y\}}^{\max\{y\}} y \cdot \mu(y) dy,$$

где: y_R – результат дефаззификации (абсцисса центра тяжести площади графика итоговой функции принадлежности выходной переменной); y и $\mu(y)$ – нечеткое множество выходной лингвистической переменной после этапа аккумуляции и ее функция принадлежности; $\min\{y\}$ и $\max\{y\}$ – левая и правая границы интервала носителя нечеткого множества y . Применение разработанной методики формирования моделей классификации дефектов и выбора корректирующих воздействий для безаварийной эксплуатации СТ иллюстрирует практический пример.

3. Результаты и обсуждение

В качестве примера, иллюстрирующего применение разработанных моделей и методики рассмотрен единичный СТ ТДЦ-250000/220 кВ энергоблока Новосибирской ТЭЦ-5. За период эксплуатации СТ с 1994 по 2012 год получено 146 образцов АРГ. Из них 39% по критериям РД отнесено к бездефектному классу состояний C_1 , а 61% к дефектному классу C_2 . На основе полученных образцов сформирована выборка $G(A)$. По выражениям (1.3) и (1.4) рассчитаны границы классов $G^I_{гр} = 0,718$ о.е. и $G^{II}_{гр} = 6,295$ о.е. Аналогично за рассматриваемый период эксплуатации СТ были рассчитаны максимальная относительная скорость i -го газа $\max\{V_{отнi}\}$ и отношение CO_2/CO . Сформирован вектор входных переменных $\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3]$. Составлены нечеткие правила продукций (3.1) для дефаззификации выходной переменной y .

1. **IF** $\{x_1 \in D(x_{11})\}$ **AND** $\{x_2 \in D(x_{21})\}$ **AND** $\{x_3 \in D(x_{31})\}$ **THEN** $\{y \in D(y_2)\}$;
 \vdots
14. **IF** $\{x_1 \in D(x_{12})\}$ **AND** $\{x_2 \in D(x_{22})\}$ **AND** $\{x_3 \in D(x_{32})\}$ **THEN** $\{y \in D(y_3)\}$;
 \vdots
27. **IF** $\{x_1 \in D(x_{13})\}$ **AND** $\{x_2 \in D(x_{23})\}$ **AND** $\{x_3 \in D(x_{33})\}$ **THEN** $\{y \in D(y_5)\}$.

Поскольку количество терм в каждом множестве $D(x_j)$ входного вектора три, то количество правил равно числу размещений с повторениями $\bar{A}_3^3 = 3^3 = 27$. В табл. 2 выборочно приведены даты протоколов АРГ СТ, а также численные значения компонент вектора \mathbf{X} и выходной переменной y .

Табл. 2. Фрагмент входного вектора \mathbf{X} с численными значениями u_i и решениями по эксплуатации СТ

Дата замера	x_1 , о.е.	x_2 , % в мес.	x_3 , о.е	y , о.е.	Решение по эксплуатации
13.12.2001	0,618	1342,520	5,000	0,245	Учащенный контроль
31.07.2006	2,054	1033,330	8,750	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
26.08.2006	0,454	0	6,857	0,030	Эксплуатация без ограничений
21.09.2006	2,050	6324,930	17,000	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
23.10.2006	7,655	111,388	16,400	0,970	Немедленный вывод из работы
01.11.2006	0,599	0	> 20,0	0,210	Учащенный контроль
06.11.2006	1,226	> 6000,0	19,000	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
13.09.2007	2,646	5797,100	4,550	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
04.12.2007	0,550	0	10,000	0,030	Эксплуатация без ограничений

10.04.2008	3,910	44,786	7,133	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
22.09.2009	5,870	17,500	6,333	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
16.08.2010	3,570	11,059	12,178	0,494	Дополнительные обследования
11.11.2011	2,101	73,370	5,944	0,750	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта
14.08.2012	9,095	39,022	5,538	0,776	Эксплуатация с ограничениями, планирование ремонта

Тестирование разработанной комплексной методики, моделей и правил принятия решений по эксплуатации СТ проведено в условиях *off-line* АРГ и периодической дегазации масла из бака блочного СТ Новосибирской ТЭЦ-5, длительное время находившегося в эксплуатации при наличии развивающегося дефекта. Полученные по разработанным моделям классы состояний и виды эксплуатационных воздействий (табл. 2) полностью согласуются с данными диагностирования СТ. Так, например, протоколы АРГ от 31.07.2006, 23.10.2006, 22.09.2009, 14.08.2012 подтверждают рекомендацию «Эксплуатация без ограничений». Это согласуется с информацией о предварительно проведенной дегазации масла СТ. Следует обратить особое внимание на протокол АРГ от 23.10.2006, когда впервые в СТ был обнаружен дефект. Обнаруженный дефект не подлежал устранению, и было принято решение продолжать эксплуатацию в режиме периодического *off-line* АРГ. По разработанным моделям отмеченное состояния относится к классу C_{22} , что соответствует решению «Немедленный вывод из работы». Таким образом, во всем диапазоне тестирования моделей и методики, полученные решения согласуются с заключениями экспертов и данными диагностического контроля СТ. Это в полной мере подтверждает достаточную достоверность разработанных диагностических моделей и возможность их практического применения в СППР по безаварийной эксплуатации СТ.

Заключение

1. Разработка высокоэффективных СППР по безаварийной эксплуатации СТ базируется на комбинации двух типов диагностических моделей: модели классификации дефектов и модели принятия решений по виду эксплуатационного воздействия. В статье представлено решение задачи с применением обобщенного многоуровневого признака, компонентами которого являются статистический (байесовский) классификатор дефектов СТ по АРГ, максимальная относительная скорость нарастания концентрации характерного газа в масле, отношение концентраций диоксида и оксида углерода.

2. Предложенное сочетание компонент обобщенного признака обеспечивает информацию о наличии развивающегося дефекта, уровне его развития и подверженности дефекту целлюлозной изоляции СТ. Эта информационная основа в полной мере использована в модели принятия решений по виду эксплуатационного воздействия на СТ, которая реализована на основе аппарата нечеткой логики и нечеткого логического вывода.

3. Тестирование разработанных математических моделей и методики их формирования выполнено на примере статистики АРГ единичного СТ Новосибирской ТЭЦ-5, длительная эксплуатация которого сопровождалась развитием опасного дефекта. Анализ полученных по моделям оценок и рекомендаций полностью подтверждается актами диагностических обследований СТ в процессе эксплуатации вплоть до вывода из работы по техническому состоянию.

Благодарности. Авторы выражают благодарность персоналу службы эксплуатации Новосибирской ТЭЦ-5 за информационную поддержку и возможность выполнить исследование с привлечением реальных данных.

Список литературы

- [1] Yu. Biçen, F. Aras, Smart asset management system for power transformers coupled with online and offline monitoring technologies, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 154, 2023, 107674, ISSN 1350-6307, URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107674> (дата обращения: 08.04.2024).
- [2] Щербатов, И. А. Система поддержки принятия решений при управлении ремонтами теплоэнергетического оборудования // *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 11, no. 3, 2023.
- [3] Берман, А. Ф. Поддержка принятия решений при выборе конструкционных материалов для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. №11. 2015. Том 81.
- [4] Федотов, М. В., Грачев, В. В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей // *Бюллетень результатов научных исследований*. 2021. Вып. 3. doi: 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114.

- [5] Левин, В. М. Статистический метод распознавания дефектов в силовых трансформаторах при их техническом обслуживании по состоянию // Промышленная энергетика. 2013. №8.
- [6] Левин, В. М., Яхья, А. А. Предиктивная аналитика и оценка технического состояния трансформаторного оборудования энергетических объектов: монография / В. М. Левин, А. А. Яхья. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 170 с. – (Монографии НГТУ).
- [7] Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00: утв. Департаментом научно-технической политики и развития ПАО ЕЭС «России» 12.12.2000.: введ. в действие с 01.01.2001. – М.: НЦ ЭНАС, 2001.
- [8] Борисов, В. В., Крутлов, В. В., Федулов, А. С. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Крутлов, А. С. Федулов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 284 с.

DETECTION TRANSFORMERS DEFECTS BY THE DGA METHOD USING STATISTICAL IDENTIFICATION AND FUZZY LOGIC

A.A. Zelenskikh (*zelenskikhaleksandr7@gmail.com*)

V.M. Levin (*levin@corp.nstu.ru*)

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

An approach to improving and unifying decision-making models for the power transformer trouble-free operation is proposed. Data processing of protocols for the dissolved gas analysis (DGA) in oil is performed using methods from probability theory and mathematical statistics. Fuzzy inference methods are used to formulate decision-making rules. A universal combined model based on a statistical Bayesian classifier and fuzzy inference models has been developed, which simplifies the issuing of an opinion on the actual condition of the transformer and the necessary operational impacts recommendation.

Keywords: dissolved gas analysis, Bayesian classifier, fuzzy inference, operational impact, decision models

УДК: 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С НИЗКИМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Ю.Н. Булатов (*bulatovyura@yandex.ru*)

В.В. Кижин (*vadim-hero4ever@yandex.ru*)

ФГБОУ ВО «БрГУ», г.Братск, Иркутская область

В современных системах электроснабжения наблюдается рост нелинейной нагрузки, использования различных преобразователей на основе силовой электроники, применения установок распределенной генерации, в том числе работающих на возобновляемых источниках энергии. В результате эксплуатируются системы электроснабжения с пониженным качеством электроэнергии. Для решения указанной проблемы предлагается применять гибридные трансформаторы, построенные с использованием преобразователей на основе силовой электроники для улучшенного регулирования напряжения, компенсации реактивной мощности и гармоник. Основной целью работы является изучение влияния гибридного трансформатора на возможности компенсации гармонических искажений напряжения и тока у потребителей электроэнергии. Исследования проводились в среде Matlab. Результаты моделирования показывают, что значительное подавление гармонических составляющих происходит в варианте с использованием гибридного трансформатора: 3-я гармоника (150Гц) снизилась с 22,25% до 0,99%; 5-я гармоника (250Гц) уменьшилась с 9,35% до 0,18%, остальные гармоники уменьшились пропорционально.

Ключевые слова: система электроснабжения, гибридный трансформатор, качество электроэнергии, гармоники, моделирование.

Введение

С развитием систем электроснабжения городов и предприятий большинству из существующих распределительных сетевых элементов приходится обеспечивать нагрузки, которые значительно превышают их допустимые показатели [Singh et al., 2015]. При этом качество электроэнергии значительно ухудшается. Для решения данной проблемы

внедряются различные технические средства и разрабатываются всевозможные новые методы по улучшению качества электроэнергии, внедряются нормативные документы, предъявляющие требования к ее показателям, однако остаются много нерешенных проблем, связанных с обеспечением бесперебойного снабжения потребителей качественной электроэнергией [Sharma et al., 2018]. Актуальным моментом для энергосистемы РФ выступает несбалансированность мощности нагрузки по фазам трехфазной сети, что является следствием естественно хаотичного подключения неполнофазных электроприемников. При сохранении подобной тенденции в электрической сети могут возникать трудности, связанные с регулированием режима работы трехфазной сети. Помимо этой проблемы несимметрия и несинусоидальность напряжения может негативно сказаться на работе силового оборудования и питаемых электроприемников, а также систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. В результате воздействия высших гармоник экономические ущербы обусловлены, главным образом, ухудшением энергетических показателей, снижением надежности функционирования электрических сетей и сокращением срока службы электрооборудования [Любимова, 2015]. В некоторых случаях имеет место ухудшение качества и уменьшение количества выпускаемой продукции.

Оценивая сложившуюся ситуацию, можно сделать вывод, что в настоящее время в условиях высоких требований к качеству электрической энергии в РФ и за рубежом фактически наблюдается существенный уровень ее искажений в сетях всех классов напряжения. Высокая стоимость и низкое качество электрической энергии стимулирует отрасль к применению различных средств компенсации описанных искажений. В этом плане гибридный распределительный трансформатор является потенциально экономически эффективным альтернативным решением различным устройствам управления распределительной сетью. Гибридный распределительный трансформатор (ГРТ) [Naj-Maharsi et al., 2010] реализован путем дополнения обычного трансформатора электронным преобразователем, который предоставляет трансформатору дополнительные возможности управления. Концепция гибридного распределительного трансформатора может обеспечивать динамическое регулирование напряжения переменного тока, компенсацию реактивной мощности [Patil et al., 2015] и, в будущих конструкциях, формировать интерфейс с устройствами накопления энергии [Gao et al., 2018]. Другие потенциальные функциональные возможности, которые могут быть реализованы с помощью гибридного распределительного трансформатора, включают регулирование фазового угла напряжения, компенсацию гармоник и компенсацию провисания напряжения [Dao et al., 2018].

Целью данной работы является изучение влияния гибридного трансформатора на возможности компенсации гармонических искажений напряжения и тока у потребителей электроэнергии.

1. Описание модели исследуемой системы

На данный момент существует большое количество конфигураций схем гибридных трансформаторов [Bala et al., 2012]. На рис. 1 представлена одна из конфигураций гибридных трансформаторов, которая будет использоваться в данной работе. Исследования проводятся в системе Matlab с разработкой имитационных моделей гибридного трансформатора и исследуемой сети в пакетах Simulink и SimPowerSystems. Схема исследуемой электрической сети с указанием основных параметров представлена на рис. 2.

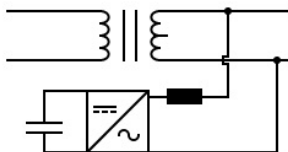


Рис. 1. Схема конфигурации гибридного трансформатора

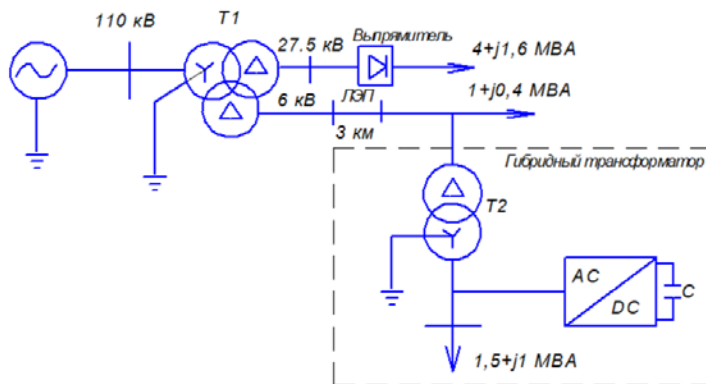


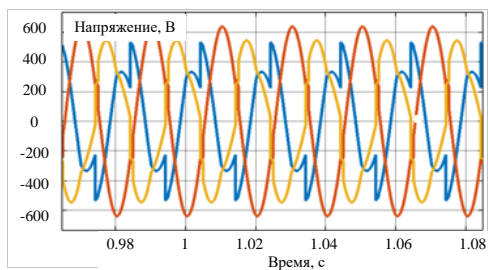
Рис. 2. Схема исследуемой электрической сети

Моделируемая схема электрической сети включает в себя следующие элементы (рис.2): трехфазный источник напряжения (110 кВ); трехобмоточный тяговый трансформатор (Т1) 110/27,5/6 кВ; нагрузки

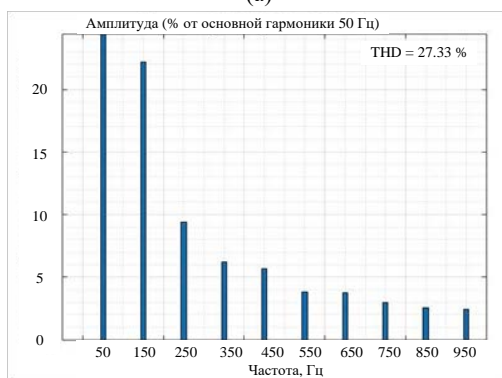
электровозов, создающие большое количество гармоник от выпрямителей (27,5 кВ); электрическая статическая нагрузка, указанная в виде полной мощности; линия электропередачи (ЛЭП) 6 кВ длиной 3 км; двухобмоточный трансформатор (Т2) 6/0,4 кВ и параллельно подключенная к обмотке низкого напряжения трансформатора через управляемый преобразователь AC/DC емкость.

2. Результаты моделирования

В качестве эксперимента рассматривается установившийся режим работы исследуемой электрической сети, когда потребители 0,4 кВ подключаются через обычный силовой трансформатор или через ГРТ. При этом особое внимание уделяется составу и изменению гармонических составляющих напряжения у потребителей 0,4 кВ при использовании гибридного трансформатора рассматриваемой конфигурации. Спектральный анализ и осциллограмма напряжений в случае использования обычного силового трансформатора представлены на рис.3.



(а)

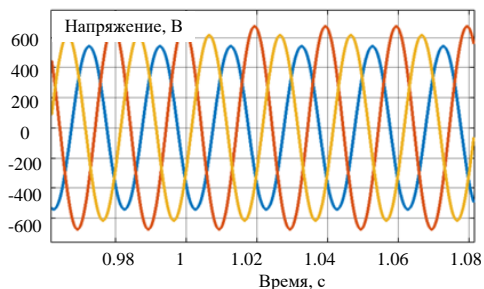


(б)

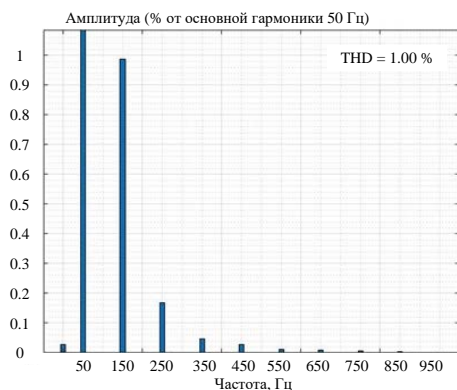
Рис. 3. Осциллограмма напряжения (а) и его гармонический состав (б) при использовании обычного силового трансформатора 6/0,4 кВ

Из рис.3 видно, что напряжение у потребителей значительно искажено и присутствует большое количество гармонических составляющих, а также наблюдается несимметрия напряжений.

Далее было выполнено моделирование работы электрической сети при использовании разработанной имитационной модели ГРТ. Полученные результаты в виде напряжения и состава гармоник представлены на рис.4.



(а)



(б)

Рис. 4. Оциллограмма напряжения (а) и его гармонический состав (б) для схемы с гибридным трансформатором

Как видно из полученного спектрального анализа и представленных оциллограмм напряжений (рис.3 и 4) значительное подавление гармонических составляющих происходит в варианте с использованием гибридного трансформатора: 3-я гармоника (150Гц) снизилась с 22,25% до 0,99%; 5-я гармоника (250Гц) уменьшилась с 9,35% до 0,18%; остальные гармоники уменьшились пропорционально и снизились до минимальных значений

Заключение

На основе выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана и испытана имитационная модель гибридного трансформатора с параллельно включённой через преобразователь емкостью на стороне низкого напряжения.

2. Гибридный трансформатор с преобразователем на основе силовой электроники может быть предложен в качестве эффективного решения компенсации гармонических искажений тока и напряжения. В рассматриваемом примере амплитуда гармонических составляющих напряжения при использовании разработанной модели гибридного трансформатора в сравнении с обычным силовым трансформатором значительно уменьшается: на частоте 150 Гц амплитуда снизилась в 22 раза; на частоте 250 Гц – в 52 раза.

Таким образом, исходя из результатов моделирования, целесообразно проведение дальнейших исследований по применению гибридных трансформаторов различных конструкций в системах электроснабжения с низким качеством электроэнергии.

Список литературы

- [1] B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, *Power Quality: Problems and Mitigation Techniques*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2015.
- [2] A. Sharma, B.S. Rajpurohit, S.N. Singh, A Review on Economics of Power Quality: Impact, Assessment and Mitigation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 88, pp. 363–372.
- [3] Любимова, Н. Г. Последствия развития распределенной энергетики / Н. Г. Любимова // Вестник университета (ГУУ), 2015. № 9. С. 352–355.
- [4] M. Y. Haj-Maharsi, L. Tang, R. Gutierrez, and S. Bala, Hybrid distribution transformer with AC & DC power capabilities, U.S. Patent, 0 201 338, Aug. 12, 2010.
- [5] N. Patil and J.H. Patil, Design and analysis of transformer using Matlab, *International Journal of Science Technology and Engineering*, 1, 2015.
- [6] X. Gao, F. Sossan, K. Christakou, M. Paolone and M. Liserre, Concurrent voltage control and dispatch of active distribution networks by means of smart transformer and storage, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2018, vol. 65, no. 8, pp. 6657-6666.
- [7] T. Dao, B.T. Phung, Effects of Voltage Harmonic on Losses and Temperature Rise in Distribution Transformers. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2018, 12, pp. 347–354.
- [8] S. Bala, D. Das, E. Aeloiza, A. Maitra and S. Rajagopalan, Hybrid distribution transformer: Concept development and field demonstration, in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, Sep. 2012, pp. 4061–4068

STUDY OF THE OPERATION OF A HYBRID TRANSFORMER IN A POWER SUPPLY SYSTEM WITH LOW QUALITY OF ELECTRIC POWER

Y.N. Bulatov (*bulatovyura@yandex.ru*)
V.V. Kizhin (*vadim-hero4ever@yandex.ru*)
Bratsk State University, Bratsk, Irkutsk region

In modern power supply systems, there is an increase in nonlinear loads, the use of various converters based on power electronics, and the use of distributed generation installations, including those powered by renewable energy sources. As a result, power supply systems are operated with reduced power quality. To solve this problem, it is proposed to use hybrid transformers built using converters based on power electronics for improved voltage regulation, compensation of reactive power and harmonics. The main goal of the work is to study the influence of a hybrid transformer on the possibilities of compensating harmonic distortions of voltage and current among electricity consumers. The studies were carried out in Matlab. The simulation results show that significant suppression of harmonic components occurs in the version using a hybrid transformer: the 3rd harmonic (150Hz) decreased from 22.25% to 0.99%; the 5th harmonic (250Hz) decreased from 9.35% to 0.18%; the remaining harmonics decreased proportionally.

Keywords: power supply system, hybrid transformer, power quality, harmonics, modeling.

УДК: 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЁТА НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛЭП 10КВ

Н.А. Абраимов (*nickabraimov@gmail.com*)
Севастопольский государственный университет,
Севастополь

Расчет натяжения провода воздушных линий электропередачи (ЛЭП) является важной задачей для обеспечения надежной и безопасной работы электросетей. В данной статье рассмотрены различные алгоритмы расчета натяжения провода воздушной ЛЭП 10 кВ. На основе проведенного исследования будут предложены рекомендации по выбору оптимальных алгоритмов расчета натяжения провода воздушной ЛЭП 10 кВ.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, провод, натяжение, расчет, алгоритм, стрела провеса.

Введение

Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) являются неотъемлемой частью системы электроснабжения. Правильное проектирование и эксплуатация ЛЭП имеет решающее значение для обеспечения надежной и эффективной передачи электроэнергии. Натяжение провода является одним из ключевых параметров, влияющих на механическую прочность и электрическую безопасность ЛЭП. Точный расчет натяжения провода имеет важное значение для обеспечения оптимальной работы ЛЭП и предотвращения аварий. Это ключевой аспект при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередач, оказывающий существенное влияние на их надежность, безопасность и экономичность.

Тема исследования особенно актуальна в связи с постоянным развитием электроэнергетической отрасли и необходимостью поддержания высокого качества электроснабжения потребителей. Подробный анализ современных методов расчета натяжения проводов позволит оптимизировать проектные решения и повысить эффективность эксплуатации ЛЭП 10кВ.

В данной статье проводится исследование различных алгоритмов расчета натяжения провода воздушной ЛЭП 10 кВ. По результатам исследования предлагаются рекомендации по расчету натяжения.

1. Обзор существующих методов расчёта натяжения провода

При эксплуатации воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 10кВ важнейшим фактором является правильный расчёт натяжения проводов. Это необходимо для обеспечения механической прочности и устойчивости конструкции, а также для предотвращения провисания и замыканий. На сегодняшний день существует несколько основных методов расчёта натяжения провода, каждый из которых имеет свои особенности и ограничения.

1. Традиционный метод расчёта по нормативным документам. Этот метод основан на использовании эмпирических формул и коэффициентов, учитывающих климатические нагрузки, вес провода, пролёт и другие факторы. Однако он не всегда даёт точные результаты, особенно в сложных климатических условиях.
2. Расчёт с помощью специализированных программных комплексов. Современные САПР позволяют моделировать поведение провода с учётом множества параметров, но требуют высокой квалификации пользователя и могут иметь ограничения по масштабируемости.
3. Аналитические методы на основе дифференциальных уравнений. Эти методы базируются на строгом математическом описании провисания провода, но требуют сложных вычислений и не всегда дают практически применимые результаты.
4. Экспериментальные методы, основанные на мониторинге реальных ЛЭП. Несмотря на высокую трудоёмкость, такие методы позволяют получить наиболее достоверные данные о натяжении провода в конкретных условиях.

Каждый из перечисленных методов имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор оптимального подхода зависит от конкретных требований проекта и доступных ресурсов. В рамках данного исследования сформируем рекомендации по выбору методу расчета, основанные на преимуществах существующих методов и учитывающие особенности воздушных ЛЭП 10кВ.

2. Особенности воздушных ЛЭП 10кВ

Воздушные линии электропередачи 10кВ имеют ряд характерных особенностей, которые необходимо учитывать при расчете натяжения провода. Во-первых, данные ЛЭП используют относительно тонкие и легкие провода, в сравнении с более высоковольтными линиями. Это позволяет уменьшить нагрузку на опоры, но делает провода более восприимчивыми к воздействию ветра, льда и других внешних факторов.

Кроме того, воздушные ЛЭП 10кВ, как правило, располагаются на небольшой высоте над землей, что увеличивает влияние рельефа местности

на формирование механических нагрузок. Перепады высот, овраги, холмы и другие особенности ландшафта могут вызывать значительные изменения в провисании и натяжении провода на соседних участках линии.

Немаловажным фактором является также климатический режим региона. Воздействие ветра, температурные перепады, гололедные нагрузки в разных климатических зонах могут сильно различаться, что требует адаптации методов расчета к местным условиям. Все эти факторы необходимо учитывать при создании комплексной модели для определения оптимального натяжения провода воздушных ЛЭП 10кВ.

3. Анализ факторов, влияющих на натяжение провода

Натяжение провода воздушной линии электропередачи 10 кВ подвержено влиянию множества различных факторов, которые необходимо тщательно учитывать при расчёте. Основными из них являются температурные, ветровые и гололёдные воздействия на провод.

Температурные изменения приводят к тепловому расширению или сжатию провода, что влияет на его натяжение. Например, при нагревании провода под воздействием солнечной радиации он удлиняется, а при охлаждении – укорачивается, что соответственно снижает или увеличивает натяжение. Эти колебания нужно учитывать при прокладке воздушных линий, чтобы избежать чрезмерного провисания или, наоборот, чрезмерного натяжения, которое может привести к разрыву провода.

Ветровые нагрузки также оказывают существенное влияние на натяжение провода. Сильные порывы ветра могут значительно отклонить провод от вертикали, что ведёт к увеличению его длины и, соответственно, снижению натяжения. С другой стороны, ветровые усилия могут создавать дополнительное статическое напряжение в проводе. Поэтому необходим тщательный учёт динамических и статических ветровых нагрузок при расчёте натяжения.

Образование гололёда на проводах также серьёзно влияет на их натяжение. Нарастание ледяной корки увеличивает массу провода, что приводит к возрастанию натяжения. В этом случае важно учитывать не только толщину гололёда, но и его плотность, которая может значительно варьироваться в зависимости от погодных условий.

3.1. Температурные воздействия

Температурные воздействия являются одним из ключевых факторов, влияющих на натяжение провода воздушной линии электропередачи напряжением 10 кВ. Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению длины провода, а значит, и его натяжения. Особенно это заметно в районах с резко континентальным климатом, где наблюдаются значительные перепады температур в течение года.

Повышение температуры приводит к удлинению провода из-за его теплового расширения, что снижает величину натяжения. Напротив, понижение температуры вызывает сокращение длины провода и, как следствие, увеличение натяжения. Эти температурные изменения необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередачи, чтобы не допустить превышения предельно допустимых значений натяжения провода, которое может привести к его обрыву или разрушению опор.

3.2. Ветровые воздействия

Одним из ключевых факторов, влияющих на натяжение провода воздушной линии электропередач 10 кВ, являются ветровые нагрузки. Ветровое давление может создавать значительные силы, которые растягивают и деформируют провода, увеличивая их провисание и напряжение. Учет ветровых нагрузок крайне важен для обеспечения безопасной эксплуатации ВЛ 10 кВ и предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Расчет ветровых нагрузок на провода должен производиться с учетом скорости ветра, его направления, а также диаметра и геометрических параметров самого провода. Необходимо также учитывать влияние местности, рельефа, наличие препятствий, которые могут изменять характер воздействия ветра. Только комплексный анализ всех этих факторов позволит получить достоверные данные для расчета максимального натяжения провода при ветровых нагрузках.

Особое внимание следует уделять расчету натяжения проводов в пролетах, расположенных на открытых, продуваемых участках. Именно в таких местах ветер способен создавать наибольшее давление, что может привести к разрыву или провисанию проводов. Инженерные методы расчета должны учитывать сложные аэродинамические явления, возникающие при обтекании ветром проводов и опор ЛЭП.

3.3. Гололедные воздействия

Гололедные нагрузки являются одним из ключевых факторов, влияющих на натяжение провода воздушных линий электропередач напряжением 10 кВ. Образование гололеда на проводах приводит к значительному увеличению веса самого провода, что, в свою очередь, вызывает резкий рост механического напряжения в металлических жилах. Это может стать причиной обрывов, провисания и даже разрушения опор ЛЭП.

Для учета гололедных нагрузок в расчетах натяжения провода необходимо оценить толщину и плотность наледи, которые зависят от целого ряда факторов, таких как температура воздуха, влажность, скорость

ветра и продолжительность гололедообразования. Особенно актуальна эта проблема для регионов с суровыми зимними условиями, где гололедные явления наблюдаются на протяжении длительного времени.

1. Методики расчета толщины и веса гололедных отложений на проводах ЛЭП 10 кВ
2. Влияние гололедных нагрузок на величину провисания и натяжения провода
3. Способы защиты воздушных линий электропередач от разрушения в условиях гололедицы

4. Алгоритм расчёта натяжения с учётом климатических факторов

Здесь рассматривается «классический» способ расчета, который был разработан из трудов профессоров А.Д. Бошняковича и А.А. Глазунова. [Бошняковича, 1962], [Глазунова, 1962]

4.1. Определение климатических условий

На первом этапе необходимо определить климатические условия в районе прокладки воздушной линии электропередачи 10 кВ. Это включает в себя анализ данных о среднегодовой температуре, скорости ветра, толщине гололедного покрова и других значимых факторов. Эти параметры оказывают существенное влияние на растяжение и напряжение провода, поэтому их необходимо учитывать при расчетах.

4.2. Расчёт натяжения

На основе полученных климатических данных производится расчёт нагрузок, действующих на провод. Это включает в себя вес провода, ветровую нагрузку, а также дополнительную нагрузку от гололедных отложений. Каждый из этих факторов вносит свой вклад в общее натяжение провода, поэтому они должны быть тщательно учтены.

В случае если у нас исходный режим – режим гололеда с ветром, то натяжение провода принимается для этого режима равным максимально допустимому. Где температура гололеда равна -5°C .

Но если исходный режим – режим минимальных температур, то тогда натяжение рассчитывается по следующей формуле:

$$H_{\Gamma} = H''_x + \frac{(H' - H'')(t_{\Gamma} - t'')}{t' - t''}$$

Если исходный режим - режим ветра максимальной интенсивности, то расчет проводят, задавая $q_x = q$ (результатирующей нагрузке в режиме максимального ветра) и $t_x = t_{\text{в}} - 5^{\circ}\text{C}$. При расчете используют метод линейной интерполяции по аналогии с нахождением H_{Γ} .

4.3. Недостатки «классического метода»

Как описано в работе Д.М. Агеева, И.П. Бостынцева и А.Я. Дидюка [3] основным недостатком такого метода является то, что выражения для расчета основных механических параметров провода были выведены на основе упрощения формулы, описывающей кривую провисания провода. В итоге это может привести к тому, что при рассмотрении больших пролетов ЛЭП или при значительных перепадах высот рельефа местности вдоль оси ЛЭП (более 150 ...200) использование «классического» способа может давать ошибки при расчетах. В результате чего необходимо проводить дополнительные расчеты для уточнения результата.

Заключение

На основе проведенного исследования можно сформулировать ряд практических рекомендаций для инженеров-проектировщиков воздушных линий 10 кВ:

1. Уделять особое внимание учету факторов, приводящих к максимальным пиковым нагрузкам на провод, таких как гололед, ветер и перепад температур.
2. Проводить регулярный мониторинг состояния ВЛ и своевременно выявлять участки с повышенным риском обрыва провода для проведения профилактических работ

Также необходимо учитывать следующие факторы:

1. Тип провода: разные типы проводов имеют разные прочностные характеристики и модули упругости.
2. Условия окружающей среды: температура, ветер, гололед и другие внешние факторы влияют на натяжение провода.
3. Пролет: длина пролета влияет на натяжение провода из-за его собственного веса и динамических нагрузок.
4. Конструктивные особенности: тип опор, расположение изоляторов и другие конструктивные особенности влияют на распределение нагрузки на провод.
5. Требования к надежности: для обеспечения надежности сети необходимо учитывать минимально допустимое натяжение и коэффициент запаса прочности.

Точный расчет натяжения провода воздушной ЛЭП 10 кВ имеет решающее значение для обеспечения механической прочности и электрической безопасности ЛЭП. Исследование алгоритмов расчета натяжения провода воздушной ЛЭП 10 кВ позволит улучшить процессы обслуживания и эксплуатации сетей, повысить их надежность и снизить вероятность возникновения аварий.

Список литературы

- [1] Бошнякович А.Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. – М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1962.
- [2] Глазунов А.А. Основы механической части воздушных линий электропередачи. Т.1. Работа и расчет проводов и тросов – М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1956.
- [3] Д.М. Агеев, И.П. Бостынец, А.Я. Дидюк Новый способ механического расчета проводов и тросов воздушных линий электропередачи // В журнале: Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010, Т.6., №7.
- [4] А. В. Паранин, Д. А. Ефимов, Контактные сети и линии электропередачи: практикум, Екатеринбург, УрГУПС, 2015.

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR CALCULATING THE TENSION OF A 10KV OVERHEAD POWER LINE WIRE

N.A. Abraimov (*nickabraimov@gmail.com*)
Sevastopol State University, Sevastopol

Calculation of wire tension of overhead power transmission lines (power lines) is an important task to ensure reliable and safe operation of power grids. This article discusses various algorithms for calculating the tension of a 10 kV overhead transmission line wire. Based on the conducted research, recommendations will be offered on the choice of optimal algorithms for calculating the tension of a 10 kV overhead transmission line wire.

Keywords: overhead power line, wire, tension, calculation, algorithm, sag boom.

УДК: 621.315.1

МОДЕЛЬ СХЛЕСТЫВАНИЯ ПРОВОДОВ ВЛЭП ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

В.А. Дружин (*vlad.druzhin2014@yandex.ru*)

Г.С. Скакун (*skakun2000@yandex.ru*)

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», Севастополь

Разработана математическая модель, определяющая возможность схлестывания проводов ВЛЭП под действием тока короткого замыкания, с расчетами, основывающимися на физических параметрах проводов. Модель можно использовать при проектировании воздушных линий электропередач напряжением 10 кВ.

Ключевые слова: ток короткого замыкания, схлестывание проводов, воздушная линия электропередачи, пролет, стрела провеса провода.

Введение

Определение возможности схлестывания проводов – актуальная задача для проектирования и эксплуатации ВЛЭП. При воздействии различных факторов на провода воздушных линий возникает вибрация и «пляска» проводов, способная как повредить сами провода и электрооборудование, так и привести к короткому замыканию на линии.

Схлестывание проводов ВЛЭП может произойти из-за ряда причин, среди которых в данной статье рассматривается электродинамическое воздействие.

Из-за электродинамического воздействия тока короткого замыкания на провода ВЛЭП, возможно разведение проводов силой Ампера с последующим их схлестыванием.

Описание модели

В настоящее время отсутствует способ определения возможности схлестывания проводов под действием электродинамического воздействия тока короткого замыкания. Для решения этой проблемы была создана математическая модель пролёта в программе MATLAB для расчета

возможного схлестывания проводов по физическим параметрам с использованием программы COMSOL.

В COMSOL проводятся основные расчеты, с целью получения величины силы Ампера и значений расстояния между проводами в различных промежутках времени.

Для расчета были взяты следующие основные параметры входных данных:

- величина тока КЗ = 3000 А,
- длительность тока КЗ = 0,4 с,
- длина пролёта = 30 м,
- расстояния между проводами = 1,1 м,
- стрела провеса провода = 0,43 м.

Также, были приняты следующие параметры сети: треугольная схема расположение проводов, короткое замыкание было сделано на один пролёт выше.

Выходными параметрами модели, являются минимальное расстояние между проводами и положение проводов в разные моменты.

Описание результатов модели

В программе MATLAB по значениям выходных параметров формируется графическое отображение результатов расчета, на рисунке 1 приведён такой график.

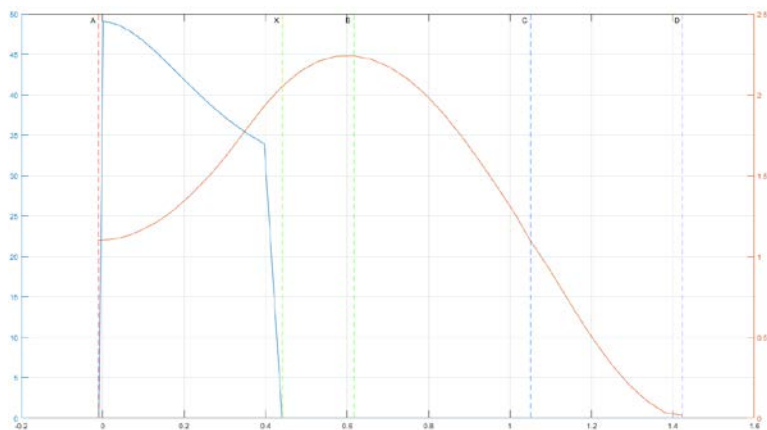


Рис. 1. Зависимости силы Ампера и расстояния между проводами от времени

График демонстрирует параметры, которые определяют возможность схлестывания проводов, в зависимости от времени. По оси абсцисс откладывается время, измеряемое в секундах. По оси ординат слева,

обозначенной голубым цветом, откладывается величина силы Ампера в Ньютонах, её график показан тем же цветом. По оси ординат справа, обозначенной оранжевым цветом, откладывается величина расстояния между проводами в метрах, её график, также, показан оранжевым цветом.

Основные моменты времени показаны вертикальными линиями с буквенными подписями:

- А – начало действия тока короткого замыкания,
- Х – конец действия силы Ампера,
- В – момент максимального удаления проводов друг от друга,
- С – момент возвращения проводов в начальное положение,
- D – момент максимального сближения, возможного схлестывания, проводов.

Далее, по значениям выходных параметров программой строится 3D перспектива, с условным обозначением опор, траверс и проводов. По оси Y откладывается выбранное расстояние между опор в метрах. По оси X откладывается выбранное расстояние между проводами или же, длина траверсы в метрах. По оси Z откладывается выбранная высота опоры, также, в метрах. На модели соответственно графику (рис.1) обозначены основные моменты времени. На рисунках 2 и 3 приведены такие модели пространственного положения проводов в различные моменты времени.

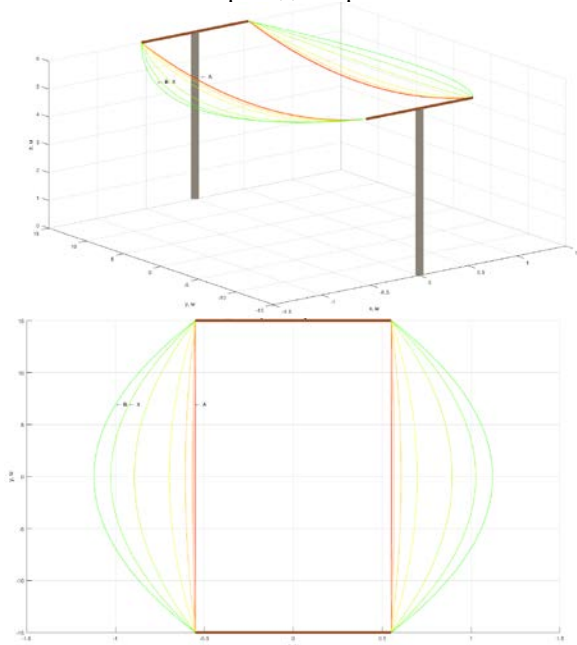


Рис. 2. Положения проводов в модели между моментами А и В

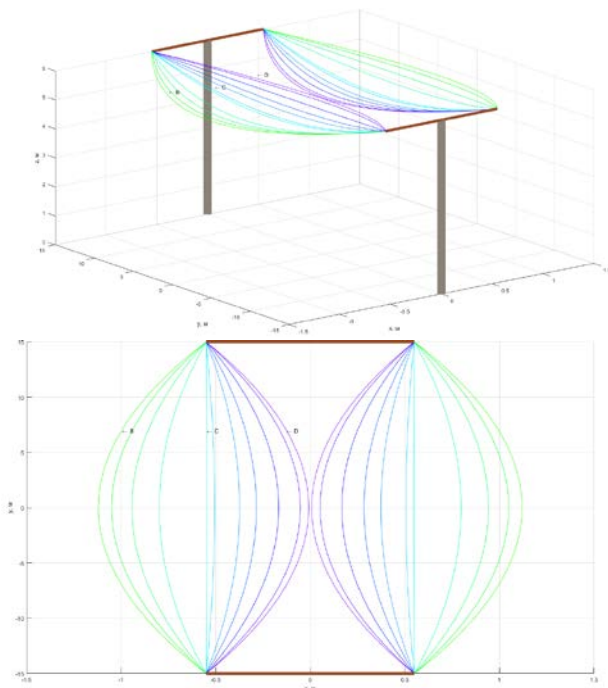


Рис. 3. Положения проводов в модели между моментами В и D

На каждой модели показано несколько положений проводов для отслеживания их движения во времени от начала действия КЗ (точка А) до максимального сближения проводов (точка D) и каждое положение провода обозначается своим цветом.

Цвета проводов обозначают момент времени. Для модели на рисунке 2, красным обозначены провода в начальном положении. Градиентом от красного к зелёному, промежуточное движение проводов, их отклонение от начального момента. Зеленым обозначен провод в максимальном отклонении от начального положения.

Для модели на рисунке 3, зеленым, обозначен такой же момент, как и на рисунке 2, голубым – момент возвращения провода в начальное положение, а фиолетовым – момент максимального сближения проводов. Градиентами от зеленого до голубого и от голубого к фиолетовому, также, обозначены промежуточные движения проводов.

Заключение

Как итог, была разработана математическая модель, которая позволяет определить возможное схлестывание проводов и их движение во времени.

Модель может быть использована для определения наилучшей стрелы провеса.

Список литературы

- [1] Кудаярова, А. А. Пляска проводов / А. А. Кудаярова, Л. Н. Хузина // Новая наука: Современное состояние и пути развития. – 2016. – № 1-1. – С. 20-22. – EDN VIJHUT.
- [2] Кабашов В. Ю. Исследование условий возможного схлестывания проводов сельских Вл 6-10 кВ // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №2.
- [3] Сергей И. И., Бладыко Ю. В., Пономаренко Е. Г., Цемехман Б. Д., Пенько Л. А. Учет электродинамического действия токов короткого замыкания при проектировании гибких токопроводов 6–10 кВ систем электроснабжения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2005. №5.

MODEL OF OVERLAPPING WIRES OF OVERHEAD POWER LINES UNDER THE ACTION OF SHORT CIRCUIT CURRENT

V.A. Druzhin (*vlad.druzhin2014@yandex.ru*)
G.S. Skakun (*skakun2000@yandex.ru*)
Sevastopol State University, Sevastopol

A mathematical model has been developed that determines the possibility of overlapping wires of overhead power lines under the influence of short circuit current, with calculations based on the physical parameters of the wires. The model can be used in the design of overhead power lines with a voltage of 10 kV.

Keywords: short circuit current, wire whipping, overhead power line, span, wire sag.

УДК: 621.31:004.82

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ВЫБОРКЕ ДАННЫХ

А.Ю. Швец (*shvetsanton01@gmail.com*)
Университет СевГУ, Севастополь

Статья исследует применение методов машинного обучения для диагностики изоляции силового трансформатора при ограниченном объеме данных. Традиционные методы мониторинга предоставляют недостаточно данных для использования в системах искусственного интеллекта. В исследовании анализируются существующие методы, тестируются точность прогнозирования и оцениваются возможности применения машинного обучения при ограниченной выборке данных. Данная работа, не имеющая аналогов в патентах, может быть полезна для оптимизации обслуживания и ремонта трансформаторов, автоматизации процессов и улучшения точности диагностики.

Ключевые слова: машинное обучение, диагностика, состояние изоляции, силовой трансформатор, данные, мониторинг, оборудование, алгоритмы, прогнозирование, точность, искусственный интеллект, интеллектуальные агенты, электроэнергетика, обслуживание, ремонт, затраты, автоматизация.

Введение

Традиционные методы мониторинга состояния оборудования электрических подстанций во второй половине 20 века часто основывались на применении ручных проверок и простых аналоговых датчиков, таких как амперметры и вольтметры, с ограниченной возможностью автоматизации и оцифровки данных. Эти методы, хоть и являлись стандартом своего времени, сегодня считаются устаревшими и неэффективными для полноценного мониторинга и диагностики оборудования в современных условиях электроэнергетики, что создает проблему для использования систем искусственного интеллекта. Необходима разработка новых подходов к диагностике состояния изоляции силового трансформатора,

основанных на использовании методов машинного обучения при ограниченном наборе входных данных. В работе более подробно изучается возможность использования таких алгоритмов машинного обучения, как “Случайный лес”, “Метод XGBoost”, “Метод опорных векторов”, “Метод k-ближайших соседей” и проводятся эксперименты по оценке точности прогнозирования. Исследование возможностей применения методов машинного обучения при ограниченном наборе исходных данных поможет в разработке систем искусственного интеллекта для диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов и в создании интеллектуальных агентов. Результаты исследования могут быть полезны для специалистов в области электроэнергетики, помогая оптимизировать процессы обслуживания и ремонта трансформаторов, что способствует снижению затрат на их эксплуатацию и ремонт. Кроме того, появится возможность автоматизировать бизнес-процессы, улучшить точность диагностики и внести вклад в работу системы поддержки принятия решений.

1. Основные понятия и определения машинного обучения

Машинное обучение - наука обучения компьютеров на основе данных. Это позволяет компьютерным программам учиться без явного программирования. Согласно Тому Митчеллу, оно заключается в том, чтобы компьютерная программа училась на опыте (E) по задаче (T) и показателю производительности (P), улучшая свою производительность по T, измеряемую P.

Важные концепции, связанные с машинным обучением, включают в себя:

1. Data Science - область, объединяющая математическую статистику, аналитику и машинное обучение для анализа и извлечения информации из данных;
2. Neural Networks - тип алгоритмов машинного обучения, имитирующих работу человеческого мозга, что позволяет автоматически извлекать закономерности из данных;
3. Deep Learning - подраздел машинного обучения, основанный на нейронных сетях с несколькими слоями, способный находить представления данных на разных уровнях абстракции;
4. Artificial Intelligence - область, создающая системы, способные выполнять задачи, которые обычно требуют участия человека, включая методы машинного обучения, глубокого обучения и нейронные сети;
5. Big Data - термин, описывающий объем информации, который слишком велик и сложен для обработки традиционными

методами, характеризующийся объемом, скоростью и разнообразием данных;

Классификация Иэна Гудфеллоу о взаимодействии понятий Data Science, Machine Learning, Neural Networks, Deep Learning и Artificial Intelligence позволяет лучше понять связи между указанными областями и их вклад в развитие искусственного интеллекта и машинного обучения.

Далее определимся с причинами использования машинного обучения.

При обнаружении проблемы начинается её изучение, сбор информации и анализ возможных причин. Затем правила фиксируются и документируются для оценки решения. Проводится анализ текущей ситуации, выявление проблем и оценка решения. При неудаче возвращаемся к изучению проблемы и анализу ошибок. При положительной оценке решение реализуется.

Традиционный подход к решению проблем сталкивается с ограничениями, такими как зависимость от человека, неспособность к адаптации и неэффективность при работе с большими объемами данных. Машинное обучение преодолевает эти ограничения благодаря автоматизации, объективности, адаптивности и эффективности. Благодаря этим преимуществам, машинное обучение становится предпочтительным в решении задач.

Машинное обучение расширяет доступ к решению задач, снижая требования к экспертизе и автоматизируя процессы. Оно повышает точность и надежность решений благодаря объективности и обучаемости моделей. Также ускоряет процесс за счёт автоматизации и возможности работы с большими данными. Машинное обучение позволяет решать задачи, недоступные традиционным методам, такие как прогнозирование и распознавание образов. В результате этих преимуществ, машинное обучение становится востребованным инструментом в различных областях, включая электроэнергетику.

2. Алгоритмы машинного обучения

Алгоритмы машинного обучения представляют собой мощные инструменты, способные извлекать ценные знания из сложных данных. Они состоят из уникальных последовательностей шагов, позволяющих достичь различных целей, таких как выявление закономерностей и создание точных прогнозов. Учебные данные играют ключевую роль в обучении модели, при их расширении модель может получить больше информации о различных сценариях и вариантах, что помогает ей лучше обучиться и адаптироваться к новым ситуациям. Важно составить качественный набор учебных данных для успешного обучения модели и достижения высокой точности в ее работе.

Алгоритмы подразделяются на три основных типа: контролируемое обучение, неконтролируемое обучение и обучение с подкреплением. В контролируемом обучении модель предсказывает результат на основе помеченных данных, в неконтролируемом обучении модель находит закономерности без меток, а обучение с подкреплением использует отзывы для принятия решений. Каждый тип алгоритмов имеет свои приложения: прогнозирование, классификация, обнаружение аномалий, прогнозирование значений, анализ временных рядов и кластеризация. Выбор алгоритма зависит от конкретной задачи и характера данных, что позволяет создавать эффективные модели для различных проблем.

В данной статье фокус основан на решении задачи классификации, в отличие от регрессии или кластеризации. Для этой конкретной задачи выбраны четыре алгоритма машинного обучения: "Случайный лес", "Метод XGBoost", "Метод опорных векторов" и "Метод k-ближайших соседей". Этот выбор обусловлен необходимостью применения многоклассовой классификации, где каждый объект может быть отнесен к одному из нескольких классов. Далее более подробно были описаны упомянутые алгоритмы.

1) Случайный лес (Random Forest Classifier).

Алгоритм случайного леса является ансамблевым методом, основанным на решающих деревьях. Он сочетает метод бэггинга и случайных подпространств. Ансамбль моделей обладает высокой точностью предсказания и способностью обрабатывать данные с большим числом признаков и классов. Каждое дерево классификации получает случайное подмножество данных и формирует прогноз на основе него. После этого результаты агрегируются. По сравнению с другими методами машинного обучения, теоретическая часть алгоритма случайного леса относительно проста.

Итоговый классификатор $a(x)$ описывается выражением (1.1):

$$a(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i(x) \quad (1.1)$$

где N – количество деревьев;

i – счётчик для деревьев;

b – решающее дерево;

x – сгенерированная на основе данных выборка.

Стоит отметить, что для задачи классификации мы выбираем решение голосованием по большинству, а в задаче регрессии – средним.

2) Метод XGBoost.

XGBoost – это алгоритм, базирующийся на градиентном бустинге деревьев решений. Градиентный бустинг строит модель предсказания в виде ансамбля слабых моделей, обычно деревьев решений. Обучение проводится последовательно: на каждой итерации вычисляются

отклонения предсказаний текущего ансамбля на обучающей выборке. Новая модель предсказывает эти отклонения, что позволяет уменьшить среднее отклонение модели. Деревья добавляются до тех пор, пока ошибка уменьшается или не выполняются правила "ранней остановки".

Рассмотрим иллюстрацию бустинга, представленную на рисунке 1. На ней рассматривается поведение модели на одной точке абстрактной задачи линейной регрессии.

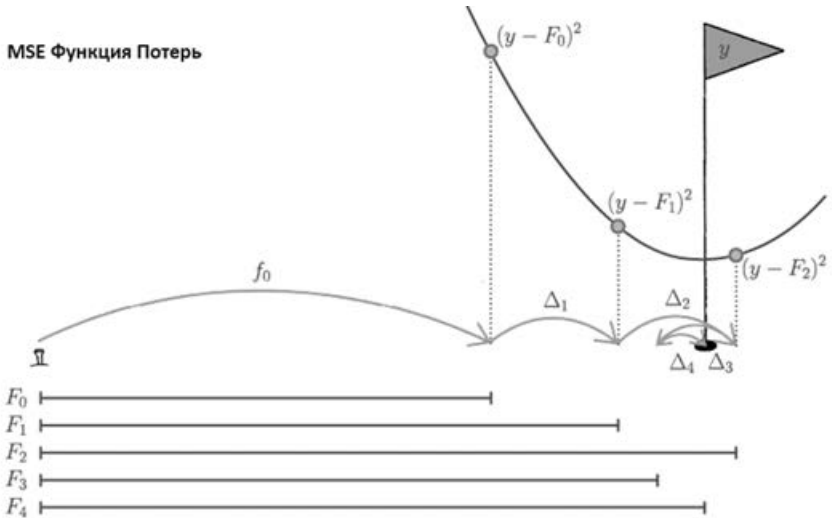


Рис. 1 – Иллюстрация бустинга

В ансамбле моделей F_0, F_1, \dots, F_4 каждая последующая модель корректирует предсказания предыдущей, уменьшая ошибку прогнозирования. А в основе алгоритма лежит функция оптимизации, представленная в выражении (1.2).

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^n l\left(y_i, \sum_{j=1}^{t-1} f_j(x_i) + f_t(x_i)\right) + \Omega(f_t), \quad (1.2)$$

где l – функция потерь; $y_i, \sum_{j=1}^{t-1} f_j(x_i)$ – значение i -го элемента обучающей выборки и сумма предсказаний первых t деревьев соответственно; x_i – набор признаков i -го элемента обучающей выборки; f_t – функция (в нашем случае дерево), которую мы хотим обучить на шаге t ; $f_t(x_i)$ – предсказание на i -ом элементе обучающей выборки; $\Omega(f)$ – регуляризация вложенной функции, описанной выражением

Далее с помощью разложения Тейлора до второго члена можем приблизить оптимизируемую функцию $L^{(t)}$ следующим выражением:

$$L^{(t)} = \sum_{i=1}^n l\left(y_i, \bar{y}_i^{(t-1)} + g_i f_t(x_i) + 0.5h_i f_t^2(x_i)\right) + \Omega(f_t), \quad (1.3)$$

где $g_i = \frac{\partial l\left(y_i, \bar{y}_i^{(t-1)}\right)}{\partial \bar{y}_i^{(t-1)}}$, $h_i = \frac{\partial^2 l\left(y_i, \bar{y}_i^{(t-1)}\right)}{\partial^2 \bar{y}_i^{(t-1)}}$.

Метод XGBoost обладает высокой скоростью обучения, точностью предсказаний и гибкостью в настройке параметров модели.

3) Метод опорных векторов (Support Vector Machines).

Метод опорных векторов (SVM) используется для решения различных задач машинного обучения, включая классификацию, регрессию и обнаружение аномалий. Он ищет опорные вектора ближе всего к разделяющей линии и максимизирует расстояние между ними и разделяющей плоскостью, называемое зазором.

Преимущества метода опорных векторов включают высокую точность классификации, гибкость в обработке различных типов данных, устойчивость к выбросам, простоту использования и возможность работы с большими объемами данных.

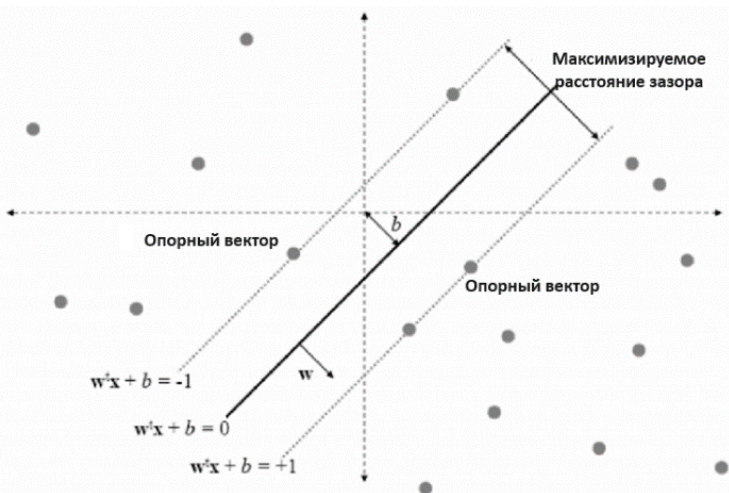


Рис. 2 – Принципиальное изображение работы метода

4) Метод k-ближайших соседей (k-Nearest Neighbors).

Метод k-ближайших соседей (kNN) - простой и интуитивно понятный алгоритм классификации, который основан на идее выбора класса на основе классов его ближайших соседей. Главная гипотеза метода - компактность: схожие примеры чаще всего принадлежат к одному классу. В качестве прогноза класса для нового объекта выбирается класс, наиболее часто встречающийся среди k его ближайших соседей, чьи классы уже известны.

В основе метода лежат такие важные математические составляющие, как:

- Евклидова метрика (евклидово расстояние, или же Euclidean distance) – метрика в евклидовом пространстве, расстояние между двумя точками евклидова пространства, вычисляемое по теореме Пифагора. Определяется по выражению (1.4)

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (1.4)$$

- Нормализация: для улучшения результатов анализа, особенно в методах, использующих расстояния между объектами, данные часто нормализуются. Например, MinMax-нормализация сжимает значения атрибутов в диапазон от 0 до 1, устраняя проблему зависимости дистанции от масштаба атрибутов., а реализация способа проводится с помощью выражения (1.5):

$$x' = \frac{x - \min[X]}{\max[X] - \min[X]} \quad (1.5)$$

Z-нормализация помогает уменьшить дисперсию данных и улучшить обобщающую способность модели, а реализуется на основе выражения (1.6).

$$x' = \frac{(x - M[X])}{\sigma[X]} \quad (1.6)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение.

3. Экспериментальная проверка алгоритмов на ограниченной выборке данных

3.1.1. Подготовка и выявление проблем исходного ограниченного набора данных

Перед реализацией алгоритмов машинного обучения была проведена процедура инжиниринга данных. Как было сказано выше, работа проводилась с ограниченным объёмом информации, а конкретно на собранных данных о технологическом состоянии 27 трансформаторов (86 параметров).

По результатам обследования силовых масляных трансформаторов классом напряжения 10/0,4 кВ были получены данные о состоянии оборудования, полученные посредством визуального осмотра конструктивных элементов устройства. Также получены результаты измерения электрических параметров изоляционных промежутков, измерения сопротивлений постоянному току, потерь ХХ, измерения физико-химических показателей трансформаторного масла. Таблица с частью отчёта можно представлена в приложении А.

Кроме того, в отчете прилагается перечень выявленных у трансформатора дефектов, в котором на основании измерений и проверок по отдельным из них определён индекс технического состояния (ИТС).

Часть отчёта, содержащая выявленные дефекты в элементах силового масляного трансформатора представлена в таблице 1.

Табл.1 – Отчет о дефектах в трансформаторах

Компонент	Наименование дефекта	Номер трансформатора								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Магнитопрвод	Повреждение	0	1	0	0	0	0	1	0	0
Обмотки	Увлажнение изоляции	0	0	1	1	1	1	0	0	1
Обмотки	Повреждение внутренних контактов обмоток НН	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Масло	Низкий уровень масла	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Масло	Увлажнение	0	0	0	1	1	1	0	1	1
Масло	Загрязнение	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Масло	Недостаток антиокислительной присадки	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Масло	Старение	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Вводы	Повреждение уплотнений	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Вводы	Повреждение внешних контактов	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ПБН	Повреждение контактов	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ПБН	Отсутствие неповрежденных ответвлений	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Радиаторы	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	1	1	1	1	1	0	1	0

Радиаторы	Механическое повреждение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Радиаторы	Отсутствие	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Радиаторы	Повреждение уплотнений	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Термосифонный фильтр	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Термосифонный фильтр	Повреждение уплотнений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бак	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Бак	Механические повреждения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Расширитель	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0
Расширитель	Повреждение уплотнений	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Расширитель	Неудовлетворительное состояние маслоуказателя	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Воздухоосушитель	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
Воздухоосушитель	Неудовлетворительное состояние силикагеля	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Воздухоосушитель	Отсутствие	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Предохранительная труба	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Предохранительная труба	Повреждение уплотнений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Термосигнализатор	Неудовлетворительное состояние поверхности	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Термосигнализатор	Неработоспособность или отсутствие	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Мановакууметр	Неработоспособность или отсутствие	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Проанализировав исходный набор данных, был сделан вывод, о необходимости проведения серии исследовательских экспериментов, связанных с подготовкой исходного набора данных, обучением и оценкой моделей.

Общая гипотеза экспериментов заключается в том, что от выбора обучающих и целевых признаков будет изменяться качество обучения

моделей машинного обучения. При этом важно учитывать, что под качеством подразумевается не только достижение наилучших значений метрик оценки качества обучения, но и то, как конкретно влияют выбранные обучающие признаки на целевую для данной работы задачу классификации состояния изоляции силового масляного трансформатора.

3.1.1 Подготовка к эксперименту №1

Цель проведения эксперимента: проверка исходного ограниченного набора данных на возможность корректного обучения моделей машинного обучения без фильтрации признаков на предмет их важности в задаче прогнозирования состояния изоляции силового трансформатора. Проведение данного эксперимента является ключевым элементом моей выпускной квалификационной работы, поскольку он позволяет на практике проверить гипотезу о возможности использования искусственного интеллекта для диагностики состояния изоляции силового трансформатора при ограниченном наборе данных (паспортные данные, результаты визуального осмотра, результаты электротехнических измерений для 27 силовых масляных трансформаторов).

Эксперимент проводится для того, чтобы определить, могут ли модели машинного обучения, обученные на ограниченном наборе данных, эффективно прогнозировать состояние изоляции силового трансформатора. Этот аспект особенно важен, так как в реальных условиях доступность данных часто бывает ограниченной из-за различных факторов, таких как высокая стоимость сбора данных, ограничения в оборудовании и другие технические трудности. Проведение эксперимента имеет критическое значение для:

Подтверждения жизнеспособности использования ИИ в задачах диагностики с минимальными исходными данными. Определения наиболее подходящих методов и алгоритмов машинного обучения для работы с ограниченными данными. Обеспечения надежности и устойчивости диагностических систем в реальных эксплуатационных условиях.

Кроме того, результаты эксперимента могут способствовать разработке более экономичных и эффективных решений для мониторинга состояния трансформаторов, что в конечном итоге приведет к улучшению их надежности и продлению срока службы.

Ожидаемые результаты: Результаты этого эксперимента должны предоставить эмпирическую основу для оценки эффективности различных моделей машинного обучения в условиях дефицита данных, что является критически важным для понимания и последующего развития методов мониторинга и диагностики электрических систем. Успешное выполнение эксперимента продемонстрирует практическую применимость выбранных

методов и обеснует их использование в реальных промышленных сценариях.

Ожидается, что эксперимент выявит, какие модели машинного обучения наиболее эффективно справляются с задачей прогнозирования состояния изоляции силового трансформатора при ограниченном наборе данных. В частности, предполагается, что:

- Некоторые модели машинного обучения смогут продемонстрировать высокую точность и надежность в прогнозировании даже при минимальной предварительной обработке данных.
- Будут определены ключевые факторы и параметры, влияющие на качество прогнозирования в условиях ограниченного объема данных.
- Результаты эксперимента покажут, что возможно создание рабочих диагностических систем на основе ИИ, которые смогут функционировать эффективно с небольшими наборами данных.

Таким образом, эксперимент предоставит ценные инсайты и рекомендации для дальнейших исследований и практического применения ИИ в области диагностики электрооборудования, особенно в условиях ограниченной доступности данных.

Ход проведения подготовки: ввиду того, что на данном этапе рассматривается исключительно подготовка к эксперименту, далее будут описаны подготовительные процедуры, касающиеся обработки исходного ограниченного набора данных.

Анализ показал, что помимо ограниченной выборки, необходимо решать такие проблемы, как

- Низкое качество данных. Под этим подразумевается наличие пропусков в данных или аномальные скачки в значениях (выбросы).
- Явный дисбаланс классов. Имеется ввиду существенное различие в обучающей выборке долей объектов разных классов.
- Данные разного масштаба (Проблема нормализации). В задаче классификации важно учитывать влияние значения каждого класса на результат. Алгоритм самостоятельно не выполняет данной задачи, из-за он с большей долей вероятности посчитает четырёхзначное число более важным, чем 0 или 1, которые использовались при сборке набора данных для бинарной классификации (наличие/отсутствие повреждения при визуальном осмотре)

По результатам анализа вышеперечисленные проблемы были устранены как посредством тщательной предобработки данных, так и внесением дополнительных функций в реализуемые алгоритмы машинного обучения.

Пропуски были устранены посредством нескольких методов, ввиду особенностей набора данных и технологических особенностей устройства трансформатора:

1. Одномерные методы. Заполнение с использованием данных одного столбца. Другими словами, чтобы заполнить пропуски мы берем данные того же признака (например, среднее арифметическое, медиана).

2. Заполнение внутригрупповым значением. Имеющиеся данные об измерениях для каждого трансформатора разбиваются на категории, после чего вычисляется медианное значение для каждой категории и только потом заполняются ими пропущенные значения.

3. Многомерные методы. Заполнение пропусков одной переменной на основе данных других признаков. Другими словами, мы строим модель машинного обучения для заполнения пропусков (например, применение логистической регрессии для заполнения пропусков, когда несколько признаков используются для построения заполняющей пропуски модели).

Выбросы, которые существенно влияют на многие статистические показатели, мешают масштабировать данные и ухудшают качество моделей машинного обучения, были удалены посредством статистических методов (boxplot, scatter plot, z-score, IQR)

Проблема дисбаланса классов решена посредством дополнительной настройки гиперпараметров (характеристики модели, которые фиксируются до начала обучения) модели.

Проблема масштабирования данных была устранена с помощью встроенных функций, широко распространённых в области Data Science библиотек Python, Sklearn.

В целом, проблема заключается в том, что модель не может достаточно точно обобщить зависимости в данных из-за нескольких основных причин.

1. Недостаточное количество данных: Обучение модели требует большого объема данных для того, чтобы она могла выучить закономерности и обобщить их на новые данные. В данном случае, вероятно, имеется недостаточное количество обучающих примеров для некоторых классов, что приводит к низкой точности и recall для этих классов.

2. Дисбаланс классов. Неравномерное распределение классов в данных может привести к смещению модели в сторону более представленных классов. Это может привести к тому, что модель будет плохо справляться с предсказанием редко встречающихся классов.

3. Несбалансированные метрики. В данном случае, модель демонстрирует низкую точность и recall для многих классов, что свидетельствует о том, что она недостаточно обучена для правильной классификации данных.

4. Неотмасштабированные данные. Некоторые алгоритмы машинного обучения, особенно те, которые основаны на расстояниях или градиентном спуске, могут требовать отмасштабированные данные для эффективной работы. Неотмасштабированные данные могут привести к тому, что модель будет сходиться медленно или с трудом.

Вывод: решение проблемы включает в себя увеличение объема тренировочных данных, балансировку классов, использование соответствующих метрик оценки качества, таких как F1-score для несбалансированных данных, и масштабирование признаков для улучшения производительности модели.

3.1.2 Подготовка к эксперименту №2

Цель проведения эксперимента: выявление наиболее подходящих обучающих признаков из исходного ограниченного набора данных, обучение на которых даст корректный результат в целевой для данной работы задаче прогнозирования электрических характеристик силового масляного трансформатора.

Ожидаемые результаты: удаление части обучающих признаков из обучающего набора данных окажет изменения на показатели качества обучения моделей машинного обучения и в целом даст результат в задаче прогнозирования электрических характеристик силового масляного трансформатора. Результаты этого эксперимента должны предоставить эмпирическую основу для оценки эффективности различных моделей машинного обучения в условиях отбора обучающих признаков, что является важным для понимания и последующего развития методов мониторинга и диагностики электрических систем.

Успешное выполнение эксперимента продемонстрирует практическую применимость выбранных обучающих признаков в задаче прогнозирования электрических параметров силового масляного трансформатора, а также будет являться обоснованием для применения данного подхода в промышленных сценариях.

Ожидается, что эксперимент выявит, какие модели машинного обучения наиболее эффективно справляются с задачей прогнозирования состояния изоляции силового трансформатора при ограниченном наборе данных с учётом фильтрации обучающих признаков во избежание мультиколлинеарности.

Ход проведения работы: первоначальная обработка проводилась аналогично эксперименту №1: устранены проблемы низкого качества данных, явного дисбаланса классов и проблема нормализации.

Далее для проверки поставленной выше гипотезы во избежание шума в данных, вызванного параметрами с бесполезной (или даже ошибочной информацией), а также для предотвращения мультиколлинеарности (если

некоторые параметры сильно коррелируют друг с другом, это может вызвать проблемы при обучении модели), были удалены из набора данных такие признаки, как «Год изготовления», «Установленная мощность, кВА», «Пиковая мощность, кВА», «ПБН. Повреждение контактов», «ПБН. Отсутствие неповрежденных ответвлений», «Вводы. Повреждение уплотнений», «Радиаторы. Механическое повреждение», «Внешний осмотр воздухоосушителя. Отсутствие предусмотренного проектом воздухоосушителя», «Воздухоосушитель. Отсутствие», «Радиаторы. Отсутствие», а также все признаки, связанные с внешним осмотром оборудования.

Эти признаки, вероятно, не будут иметь прямого влияния на процесс обучения модели машинного обучения, поскольку они описывают в основном внешние или механические характеристики оборудования, которые могут быть важными для целей обслуживания и обследования, но не являются ключевыми параметрами для прогнозирования его электрических характеристик.

На данном этапе процесс подготовки данных для проведения эксперимента можно считать завершённым. Далее описана процедура окончательной подготовки, которая присуща обоим экспериментам.

В последствии для большего удобства табличные названия признаков были закодированы в формате: «Измерение потерь XX. Потери XX а-с, Вт» → «Opt20», как показано рисунке 3

	pd1	pd2	pd3	pd4	pd5	pd6	opt1	opt2	opt3	opt4	...	res22	res23
1	1986	250	90	0.571816	3.738200	0.9083	0	1	0	Null	...	0	0
2	1988	630	437	1.096041	7.517950	0.1577	0	1	0	0	...	0	0
3	2006	400	672	0.796065	5.332933	1.1330	1	1	0	0	...	0	Null
4	2006	400	94	0.796065	5.332933	1.6890	Null	1	0	0	...	0	0
5	1968	400	368	0.796065	5.332933	1.5660	2	1	0	0	...	0	0

Рис. 3 – Необработанный набор данных

По завершению этапа подготовки данных следует перейти к непосредственному обучению моделей машинного обучения, что рассмотрено в следующей подглаве данной работы

3.2 Экспериментальная проверка базовых алгоритмов на ограниченном наборе входных данных

Общий алгоритм процесса разработки модели для каждого из методов в первую очередь представляет собой подготовку исходного набора данных, которая проводится с учётом всех вышеуказанных проблем и особенностей

данного процесса, описанных индивидуально в процессе подготовки для эксперимента №1 и эксперимента №2.

Далее необходимо произвести загрузку исходных данных в csv-формате с последующей их подготовкой. После чего имеющиеся данные необходимо разбить на обучающую и тренировочную выборки (размер тренировочной выборки составляет 20% от всей).

После, с помощью встроенных в библиотеку `python.sklearn` функций (`StandardScaler()`, `scaler.transform()`) производилось масштабирование данных.

Уже преобразованные данные следовали на обучение модели, которое проводилось с предварительной настройкой гиперпараметров. Гиперпараметрами вносились коррективы по устранению дисбаланса классов, а также производилась оптимизация их оптимизация с помощью алгоритма `GridSearchCV`, при использовании которого исследуется каждая комбинация гиперпараметров для определения их наилучшей комбинации.

По результатам обучения модели, производилась оценка качества процесса, что выполнялось с помощью таких метрик, как точность (`accuracy`), точность (`precision`), полнота (`recall`), F-мера (`F1-score`), а также с помощью сводных встроенных в библиотеку `sklearn` метрик `Micro Average`, `Macro Average`, `Weighted Average`, `Samples Average`. Далее для более полного понимания проведённой работы представлено описание сводных метрик.

1. `Micro avg (Micro Average)`: считает общее количество верных предсказаний и общее количество примеров без учета классов. Используется для вычисления `precision`, `recall` и `f1-score` на уровне всех примеров. Подходит, когда классы сбалансированы или когда важна общая производительность модели по всем примерам, без учета дисбаланса классов.

2. `Macro avg (Macro Average)`: вычисляет метрики для каждого класса и затем берет среднее значение этих метрик. Каждому классу присваивается одинаковый вес, независимо от его размера. Полезно, когда важна производительность модели по каждому классу отдельно и нужно учитывать даже малые классы. Придает равный вес каждому классу, что может быть полезно в задачах, где важно хорошее предсказание для всех классов.

3. `Weighted avg (Weighted Average)`: вычисляет метрики для каждого класса и затем берет среднее значение этих метрик, взвешенное по количеству примеров в каждом классе. Это дает больший вес метрикам классов с большим количеством примеров. Хорошо подходит для задач с несбалансированными классами, поскольку учитывает дисбаланс классов и дает более точное представление о производительности модели на всех данных.

4. Samples avg (Samples Average): применяется для многозначных меток (multi-label) и вычисляет метрики на уровне каждого примера, затем берет среднее по всем примерам. Полезно для задач с многозначными метками, где каждый пример может принадлежать к нескольким классам одновременно.

Для оценки точности алгоритма в большинстве задач с несбалансированными как в рассматриваемом в работе случае классами, weighted avg (взвешенная средняя) метрика будет наиболее важной и информативной. Она учитывает дисбаланс классов и дает более адекватное представление о производительности модели по всем данным.

Если же классы сбалансированы или важно учитывать каждую метку отдельно без учета их частоты, macro avg (макро средняя) может быть полезной. Для многозначных меток следует использовать samples avg (средняя по образцам).

3.2.1 Эксперимент №1

Ход выполнения эксперимента: общая для обоих экспериментов процедура разработки моделей описана выше. В ходе данного эксперимента без внесения дополнительных корректив фокус решения задачи был направлен на оценку качества моделей машинного обучения.

По результатам эксперимента были получены значения метрик качества обучения, которые были сведены в Таблицу 2.

Табл. 2 – Значения метрик качества обучения для эксперимента №1

XGBoost (Training Accuracy: 80.0%, Model Accuracy Score: 20.00%)				
	precision	recall	f1-score	support
Micro avg	0.95	0.97	0.96	63
Macro avg	0.46	0.48	0.47	63
Weighted avg	0.94	0.97	0.95	63
Samples avg	0.95	0.97	0.96	63
Случайный лес (Training Accuracy: 100.0%, Model Accuracy Score: 16.67%)				
	precision	recall	f1-score	support
Micro avg	0.91	0.96	0.93	74
Macro avg	0.44	0.47	0.45	74
Weighted avg	0.91	0.96	0.93	74
Samples avg	0.91	0.96	0.93	74
Метод k-ближайших соседей (Training Accuracy: 20.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
Micro avg	0.84	0.80	0.82	61
Macro avg	0.36	0.35	0.35	61

Weighted avg	0.81	0.80	0.79	61
Samples avg	0.85	0.80	0.82	61
Метод опорных векторов (Training Accuracy: 65.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
accuracy	0.00	0.00	0.00	5
Macro avg	0.00	0.00	0.00	5
Weighted avg	0.00	0.00	0.00	5

Модель, обученная с помощью алгоритма Случайного леса сильно переобучена, так как точность на обучающей выборке составляет 100%, в то время как точность на тестовой выборке очень низкая (16.67%). Это указывает на то, что модель плохо обобщает на новых данных.

- **micro avg:** Высокие значения precision, recall и f1-score указывают на то, что в среднем модель хорошо справляется с классификацией, если учитывать общее количество истинных положительных, ложных положительных и ложных отрицательных результатов.
- **macro avg:** Низкие значения показывают, что модель плохо справляется с классами, имеющими меньшее количество примеров, так как macro avg учитывает среднее значение для каждого класса без учета их количества.
- **weighted avg:** Высокие значения, схожие с micro avg, указывают на то, что модель лучше работает с более частыми классами.
- **samples avg:** Похож на micro avg и weighted avg, что подтверждает хорошую производительность на уровне образцов.
- Высокие значения micro avg и weighted avg говорят о хорошей производительности модели для часто встречающихся классов.
- Низкие значения macro avg указывают на проблемы с классификацией редких классов.

Модель, обученная с помощью XGBoost, также демонстрирует признаки переобучения, хотя и в меньшей степени по сравнению со Случайным лесом. Точность на тестовой выборке выше, но все еще низкая (20.0%).

- **micro avg:** очень высокие значения указывают на хорошую производительность модели в целом, несмотря на низкую модельную точность.
- **macro avg:** указывает на проблемы с классификацией менее частых классов.
- **weighted avg:** высокие значения подтверждают, что модель лучше справляется с более частыми классами.
- **samples avg:** высокие значения, схожие с micro avg и weighted avg, показывают, что модель хорошо работает на уровне отдельных образцов.

- Очень высокие значения `micro avg` и `weighted avg` показывают, что XGBoost лучше справляется с задачей для часто встречающихся классов.

- Значения `macro avg` немного выше, чем у RandomForest, указывая на небольшое улучшение в классификации редких классов.

Модель, обученная с помощью Метода опорных векторов, не способна правильно классифицировать данные на тестовой выборке (0.0% точности). Возможно, это связано с тем, что данные не линейно разделимы, и SVM не справляется с этой задачей без дополнительных настроек и выбора ядра.

- `accuracy`: нулевая точность указывает на полную неспособность модели к правильной классификации на тестовой выборке.

- `macro avg` и `weighted avg`: все значения равны нулю, что подтверждает неспособность модели классифицировать данные.

- Нулевая точность и все метрики указывают на неспособность SVM справиться с задачей классификации на тестовых данных.

Модель, обученная с помощью Метода k-ближайших соседей, также не справляется с задачей классификации на тестовой выборке (0.0% точности). Это может быть связано с тем, что алгоритм K-ближайших соседей требует тщательного подбора параметров и возможно, большего объема данных для адекватной работы.

- `micro avg`: довольно высокие значения, несмотря на нулевую точность модели, могут указывать на то, что модель хорошо работает с часто встречающимися классами в обучающей выборке.

- `macro avg`: низкие значения показывают, что модель плохо справляется с менее частыми классами.

- `weighted avg`: высокие показатели указывают на то, что модель лучше справляется с более частыми классами, несмотря на низкий общий показатель точности.

- Высокие значения `micro avg` и `weighted avg` указывают на то, что модель хорошо работает с часто встречающимися классами.

- Низкие значения `macro avg` показывают проблемы с редкими классами.

Как можно заметить, самые лучшие значения метрик качества наблюдаются при применении метода XGBoost, следом за ним идут Случайный лес, Метод k-ближайших соседей и Метод опорных векторов, который вовсе не справился с задачей, ввиду неприменимости особенностей работы алгоритма для многоклассовой классификации на столь малом объеме данных.

Далее на примере отчёта классификации метода XGBoost более подробно можно рассмотреть оценку качества алгоритма при работе с ограниченной выборкой данных. Отчёт представлен на рисунке 4.

Training Accuracy : 80.0 %
Model Accuracy Score : 20.0 %

```
-----  
Classification_Report:  
      precision    recall  f1-score   support  
  
 0         1.00      1.00      1.00         5  
 1         0.50      1.00      0.67         2  
 2         0.00      0.00      0.00         0  
 3         0.00      0.00      0.00         0  
 4         1.00      1.00      1.00         5  
 5         1.00      1.00      1.00         5  
 6         0.00      0.00      0.00         0  
 7         0.00      0.00      0.00         0  
 8         0.00      0.00      0.00         1  
 9         0.00      0.00      0.00         0  
10         1.00      1.00      1.00         5  
11         1.00      1.00      1.00         5  
12         1.00      1.00      1.00         3  
13         0.00      0.00      0.00         1  
14         0.00      0.00      0.00         0  
15         0.00      0.00      0.00         0  
16         1.00      1.00      1.00         1  
17         0.00      0.00      0.00         0  
18         1.00      1.00      1.00         5  
19         0.00      0.00      0.00         0  
20         0.00      0.00      0.00         0  
21         0.00      0.00      0.00         0  
22         0.00      0.00      0.00         0  
23         0.00      0.00      0.00         0  
24         1.00      1.00      1.00         3  
25         0.75      1.00      0.86         3  
26         1.00      1.00      1.00         5  
27         0.00      0.00      0.00         0  
28         1.00      1.00      1.00         4  
29         1.00      1.00      1.00         5  
30         1.00      1.00      1.00         5  
  
   micro avg       0.95       0.97       0.96        63  
   macro avg       0.46       0.48       0.47        63  
weighted avg       0.94       0.97       0.95        63  
  samples avg       0.95       0.97       0.96        63
```

Рис. 4 – Отчёт классификации

XGBoost также показал немного лучшие результаты по macro avg (precision 0.46, recall 0.48, f1-score 0.47) по сравнению с RandomForest, что указывает на лучшую работу с редкими классами.

Таким образом, XGBoost лучше всего справился с задачей классификации состояния изоляции силового трансформатора на данном наборе данных.

Вывод: проведенный эксперимент по выявлению наиболее подходящих обучающих признаков для прогнозирования состояния изоляции силового

трансформатора при ограниченном наборе данных позволил получить важные результаты. Метод XGBoost показал наилучшие результаты среди протестированных методов с precision равным 0.46, recall равным 0.48 и f1-score равным 0.47.

Случайный лес продемонстрировал схожие, но несколько более низкие метрики (precision - 0.43, recall - 0.47 и f1-score - 0.45).

Метод k-ближайших соседей оказался менее эффективным, а Метод опорных векторов не продемонстрировал значимых результатов.

Были выявлены ключевые признаки, такие как температура масла, уровень влажности, химический состав масла и признаки, связанные с электротехническими измерениями состояния конструктивных элементов трансформатора, которые существенно влияют на прогнозирование состояния изоляции.

Таким образом, эксперимент подтвердил жизнеспособность использования ИИ для диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов и предоставил ценные рекомендации для дальнейших исследований и практического применения в области диагностики электрооборудования, но для достижения лучших результатов необходимо выполнить фильтрацию признаков и отбор наиболее значимых характеристик, что было обозначено выше. Это может помочь сократить многомерность данных и улучшить обобщающую способность моделей.

Как уже неоднократно было отмечено, недостаток данных часто приводит к переобучению и плохой обобщающей способности моделей, следовательно разумно будет в рамках проводимой работы провести настройку гиперпараметров для всех моделей, а также рассмотреть возможность использования более сложных моделей и методов, которые смогут улучшить точность и устойчивость модели.

3.2.2 Эксперимент №2

Ход выполнения эксперимента: как было обозначено в процессе подготовки второго эксперимента и подтверждено в ходе выполнения первого, особую важность для качественного обучения представляют такие признаки, как температура масла, уровень влажности, химический состав масла и признаки, связанные с электротехническими измерениями состояния конструктивных элементов трансформатора, на которых в данном случае и были обучены модели машинного обучения.

По результатам эксперимента были получены значения метрик качества обучения, которые были сведены в Таблицу 3.

Таб.3 – Значения метрик качества обучения для эксперимента №2

XGBoost (Training Accuracy: 85.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
Micro avg	0.80	0.83	0.82	48

Macro avg	0.34	0.35	0.34	48
Weighted avg	0.83	0.83	0.83	48
Samples avg	0.80	0.83	0.81	48
Случайный лес (Training Accuracy: 30.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
Micro avg	0.81	0.82	0.81	56
Macro avg	0.35	0.36	0.33	56
Weighted avg	0.85	0.82	0.81	56
Samples avg	0.81	0.82	0.81	56
Метод k-ближайших соседей (Training Accuracy: 100.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
accuracy	0	0	0	5
Macro avg	0	0	0	5
Weighted avg	0	0	0	5
Метод опорных векторов (Training Accuracy: 70.0%, Model Accuracy Score: 0.0%)				
	precision	recall	f1-score	support
accuracy	0	0	0	5
Macro avg	0	0	0	5
Weighted avg	0	0	0	5

В данном случае модель XGBoost показала улучшение своих метрик по сравнению с первым экспериментом, особенно по weighted avg (precision: 0.83, recall: 0.83, f1-score: 0.83), несмотря на снижение общего показателя Training Accuracy до 85.0%, при этом значение точности на тренировочных данных вовсе упало до 0.0%.

Случайный лес снизил точность на тренировочных данных (Training Accuracy: 30.0%), но показал схожие метрики с XGBoost по weighted avg (precision: 0.85, recall: 0.82, f1-score: 0.81), касательно значения точности на тренировочных данных ситуация аналогична XGBoost.

Метод k-ближайших соседей и Метод опорных векторов снова не продемонстрировали значимых результатов, оставшись на нулевом уровне метрик по всем параметрам.

Далее на примере отчёта классификации метода XGBoost более подробно можно рассмотреть оценку качества алгоритма при работе с ограниченной выборкой данных. Отчёт представлен на рисунке 5.

Как видно по значению Training Accuracy модель показала высокую точность на тренировочных данных (85.0%). Но величина Model Accuracy Score демонстрирует нулевую точность на тестовых данных (0.0%), что

указывает на возможные проблемы с обобщением модели на новых данных. Если делать выводы по классам, то можно сказать, что к хорошо распознаваемым классам относятся классы 0, 4, 6, 11, 12, 14 и 24, которые имеют высокие значения precision, recall и f1-score (все равны 1.00), что указывает на то, что модель очень хорошо справляется с распознаванием этих классов. Более того, необходимо отметить и проблемные классы, к которым относятся уже , классы 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 23, множество из которых имеют нулевые (или близкие к нулю) значения precision, recall и f1-score, что явно демонстрирует нам неспособность модели правильно классифицировать объекты этих классов. В свою очередь замечу, классы 1, 5, 7, 8, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 22 имеют очень малый объем данных (support), из-за чего могла возникнуть малая обученность модели на этих классах.

```

Training Accuracy      : 85.0 %
Model Accuracy Score  : 0.0 %
-----
Classification Report:

```

	precision	recall	f1-score	support
0	1.00	1.00	1.00	5
1	0.33	0.50	0.40	2
2	0.00	0.00	0.00	0
3	0.00	0.00	0.00	0
4	1.00	1.00	1.00	5
5	1.00	1.00	1.00	5
6	0.00	0.00	0.00	0
7	0.00	0.00	0.00	0
8	0.00	0.00	0.00	0
9	0.75	1.00	0.86	3
10	0.00	0.00	0.00	0
11	0.00	0.00	0.00	1
12	0.00	0.00	0.00	0
13	1.00	1.00	1.00	5
14	0.00	0.00	0.00	0
15	0.00	0.00	0.00	0
16	0.00	0.00	0.00	0
17	0.00	0.00	0.00	0
18	0.00	0.00	0.00	0
19	0.00	0.00	0.00	3
20	1.00	1.00	1.00	5
21	0.00	0.00	0.00	0
22	0.50	0.25	0.33	4
23	1.00	1.00	1.00	5
24	1.00	1.00	1.00	5
micro avg	0.80	0.83	0.82	48
macro avg	0.34	0.35	0.34	48
weighted avg	0.83	0.83	0.83	48
samples avg	0.80	0.83	0.81	48

Рис. 5 – Отчёт классификации

Касательно сводных метрик можно сделать вывод о том, что метрики Micro avg достаточно высокие (precision: 0.80, recall: 0.83, f1-score: 0.82), что указывает на хорошую производительность модели в целом. Метрики Macro avg заметно ниже (precision: 0.34, recall: 0.35, f1-score: 0.34), что свидетельствует о значительных проблемах с классификацией некоторых классов. У метрики Weighted avg наблюдаются высокие показатели (precision: 0.83, recall: 0.83, f1-score: 0.83), которые говорят о способности модели хорошо работать при учёте классов с большим количеством примеров. Метрики Samples avg также высокие (precision: 0.80, recall: 0.83, f1-score: 0.81), подтверждая общую высокую производительность модели.

Вывод: несмотря на высокую точность на тренировочных данных и хорошие сводные метрики, модель XGBoost из второго эксперимента показала нулевую точность на тестовых данных, что указывает на переобучение модели. При этом модель хорошо справляется с распознаванием лишь некоторых классов, а множество других классов вовсе не может классифицировать, особенно те, для которых данных очень мало. Это свидетельствует о необходимости дальнейшей работы над улучшением модели и возможно добавления большего количества данных для некоторых классов.

3.2.3 Итоговый вывод по экспериментам

В результате проведенных экспериментов удалось добиться значительных улучшений в качестве моделей машинного обучения благодаря устранению мультиколлинеарности и удалению ненужных признаков из набора данных. В первом эксперименте модели машинного обучения, включая XGBoost, обучались на полном наборе признаков, что приводило к значительным проблемам с переобучением и низкой точностью на тестовых данных. Модель преимущественно обучалась на признаках, которые не оказывали существенного влияния на прогнозирование состояния изоляции силового трансформатора. Эти признаки включали такие параметры, как «Год изготовления», «Установленная мощность, кВА», «Пиковая мощность, кВА», «ПБН. Повреждение контактов», «ПБН. Отсутствие неповрежденных ответвлений», «Вводы. Повреждение уплотнений», «Радиаторы. Механическое повреждение», «Внешний осмотр воздухоосушителя. Отсутствие предусмотренного проектом воздухоосушителя», «Воздухоосушитель. Отсутствие», «Радиаторы. Отсутствие», а также все признаки, связанные с внешним осмотром оборудования.

Во втором эксперименте, после удаления вышеуказанных неважных признаков, удалось существенно улучшить метрики модели. Удаление лишних признаков позволило устранить мультиколлинеарность и снизить переобучение модели. Несмотря на то, что точность на тренировочных

данных значительно упала, это падение обусловлено тем, что были удалены признаки, которые не являлись ключевыми для прогнозирования электрических характеристик трансформатора. В результате модель XGBoost показала себя наилучшим образом для решения поставленной задачи, продемонстрировав высокие значения precision, recall и f1-score.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили, что удаление неважных признаков улучшает обобщающую способность модели и уменьшает проблему переобучения. Это подтверждает жизнеспособность использования модели XGBoost для диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов, даже в условиях ограниченного набора данных. Однако, для достижения более точного и качественного результата, необходимо увеличивать объем исходных данных либо применять более сложные методы машинного обучения, приспособленные к работе с малыми объемами данных.

Заключение

Исследование возможности применения машинного обучения для диагностики состояния изоляции силового трансформатора на ограниченном наборе данных является важным шагом в направлении автоматизации и улучшения процессов технического обслуживания энергетических систем. Результаты анализа показали, что модель, обученная на предоставленных данных, имеет высокую точность, однако она склонна к переобучению.

Выявленные низкие значения метрик precision, recall и F1-score свидетельствуют о недостаточной способности модели к обобщению на новые данные и необходимости коррекции стратегии обучения или моделирования. Дальнейшее развитие исследований в этой области может включать расширение объема данных для обучения модели, применение специализированных алгоритмов обучения, использование дополнительных признаков для повышения точности диагностики и внедрение узконаправленных методов из области глубокого обучения.

Тем не менее, несмотря на выявленные ограничения, результаты данного исследования представляют ценность для инженеров и специалистов в области энергетики, обеспечивая основу для развития более эффективных методов диагностики состояния изоляции силовых трансформаторов.

Благодарности. Работа выполнена на средства Российского научного фонда в рамках программы: «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми индивидуальными научными группами» (региональный конкурс) № 24-21-2001 «Искусственный интеллект в диагностике неисправностей и оценке состояния электросетевого оборудования».

Список литературы

- [1] Петрова, С. Ю. Прогнозирование остаточного ресурса сетевого маслонаполненного электрооборудования с использованием технологий искусственного // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Материалы 93-его заседания семинара. В 2-х книгах. Отв. редактор Н.И. Воропай. — Иркутск : 2021. — С. 143-151.
- [2] Бакланов А. Н., Чередниченко В. С., Мусин М. В. и др. Применение современных компьютерных технологий для решения задач оценки функционального состояния силовых масляных трансформаторов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7 (79). С. 248-258. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sovremennyh-kompyuternyh-tehnologiy-dlya-resheniya-zadach-otsenki-funktsionalnogo-sostoyaniya-silovyh-maslyanyh>.
- [3] Брякин И. В., Бочкарев И. В. Система мониторинга технического состояния силового трансформатора по состоянию масла // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1 (53). С. 34-46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-monitoringa-tehnicheskogo-sostoyaniya-silovogo-transformatora-po-sostoyaniyu-masla>
- [4] Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории : монография. М. : Горячая линия – Телеком, 2012. 496 с.
- [5] Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А. И. Хальясмаа [и др.]. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 64 с.
- [6] Оценка качества моделей машинного обучения: выбор, интерпретация и применение метрик / А. Михнин — «Автор», 2023

RESEARCH ON THE FEASIBILITY OF APPLYING MACHINE LEARNING FOR DIAGNOSING THE INSULATION CONDITION OF POWER TRANSFORMERS WITH LIMITED DATA SAMPLING

A.Y. Shvets (*shvetsanton01@gmail.com*)
Sevastopol State University, Sevastopol

The article explores the application of machine learning methods for diagnosing the insulation condition of power transformers with limited data. Traditional monitoring methods provide insufficient data for use in artificial intelligence systems. The study analyzes existing methods, tests forecasting accuracy, and evaluates the potential of machine learning application with a limited data sample. This novel work, devoid of analogs

in patents, may prove beneficial for optimizing transformer maintenance and repair, automating processes, and enhancing diagnostic accuracy.

Keywords: machine learning, diagnostics, insulation condition, power transformer, data, monitoring, equipment, algorithms, forecasting, accuracy, artificial intelligence, intelligent agents, electrical power engineering, maintenance, repair, costs, automation.

УДК 621.316.1

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО АЛГОРИТМА АНАЛИЗА КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.О. Мещеряков (*maxim.mescheriakov@yandex.ru*)

Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень

Искажение симметрии напряжений приводит к негативным последствиям работы электрических сетей нефтегазовых предприятий. В статье разработана цифровая модель, предназначенная для анализа коэффициента несимметрии напряжения в реальном времени. Модель разработана в программном пакете MATLAB Simulink с применением симуляции реальной электрической сети.

Ключевые слова: коэффициент несимметрии, моделирование, электрическая сеть, электротехническая система, цифровой алгоритм, обратная последовательность, Simulink, Matlab.

Введение

Искажение несимметрии напряжений приводит к увеличению потерь, уменьшению срока эксплуатации оборудования, а также к снижению эффективности его работы. Таким образом, необходимо создать условия нормальной работы оборудования: контролировать и корректировать несимметрию напряжений. Особенную актуальность данная тема имеет в нефтегазовой отрасли, где от работоспособности и эффективности электротехнического оборудования зависит функционирование месторождений, линейных трубопроводов, а также нефтегазовых промыслов.

1. Несимметрия напряжений в трехфазных системах

Несимметрия напряжений объясняется наличием в трехфазных системах электроснабжения нефтегазовых предприятий потребителей, симметричное исполнение которых невозможно или экономически нецелесообразно. Также одной из причин несимметрии могут служить

аварийные режимы работы сетей: несимметричные короткие замыкания или обрывы фаз.

В соответствии с ГОСТ 32144-2013 [1], несимметрия напряжений оценивается следующими показателями: коэффициент несимметрии по обратной последовательности и коэффициент несимметрии по нулевой последовательности.

Данные показатели являются нормированными показателями качества электроэнергии. Согласно [1], коэффициент несимметрии удовлетворяет требованиям данного стандарта, если усредненные в интервале 10 минут значения коэффициентов не превышают 2% в течение 95% времени в одну неделю, и не выходят за пределы 4% в течение 100% этого интервала.

В данной статье разбирается анализ коэффициента несимметрии обратной последовательности, так как данный коэффициент можно вычислить только с использованием межфазных напряжений. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности вычисляется по следующей формуле (1.1):

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100, \quad (1.1)$$

где U_2 – напряжение обратной последовательности в трехфазной системе электроснабжения; U_1 – напряжение прямой последовательности в трехфазной системе электроснабжения.

Уравнение (1.1) позволяет вычислять несимметрию напряжений в системе только с использованием межфазных напряжений. Преобразовав уравнение (1.1), получим формулу для вычисления коэффициента несимметрии обратной последовательности (1.2):

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}}, \quad (1.2)$$

где β вычисляется по формуле (1.3):

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}, \quad (1.3)$$

где U_{ij} – основная составляющая напряжения между фазами i и j .

Технически измерение межфазных напряжений можно реализовать с помощью трансформаторов напряжения, располагаемых в РУНН или КТП. Вычисление коэффициента несимметрии возможно реализовать с помощью микропроцессорной техники в соответствии с цифровым алгоритмом, разработанным в данной статье.

Суть анализа коэффициента несимметрии и влияния подключенных электроприемников заключается в сборе статистических данных, следовательно, необходим цифровой алгоритм сбора информации. Данный алгоритм кроме сбора значений межфазных напряжений должен вычислять коэффициенты несимметрии дискретно с интервалом времени, принятым

на этапе проектирования электрической сети нефтегазового предприятия или при его реконструкции.

Цифровой алгоритм разработан в программе, предоставляющей возможность создания симуляции электрической сети с возможностью применения булевой алгебры и простейших вычислений.

2. Разработка системы в Matlab Simulink

Система, обеспечивающая сбор информации о несимметрии напряжений, должна соответствовать определенным требованиям:

1. Простота и эргономичность: данный критерий необходим для максимальной оптимизации процессов.

2. Надежность: алгоритмы работы системы должны быть осуществимы при любых возмущениях в сети.

3. Полезность: сбор информации должен способствовать улучшению работы энергетической сети предприятия.

4. Применимость: алгоритмы должны быть реализуемыми на существующей микропроцессорной технике.

Разработка системы, симулирующую реальную электрическую сеть (в упрощенном виде) начинается с создания таких элементов, как источник питания, потребитель электроэнергии, коммутирующие устройства, логические блоки и арифметические блоки.

Система представлена на рисунке 1.

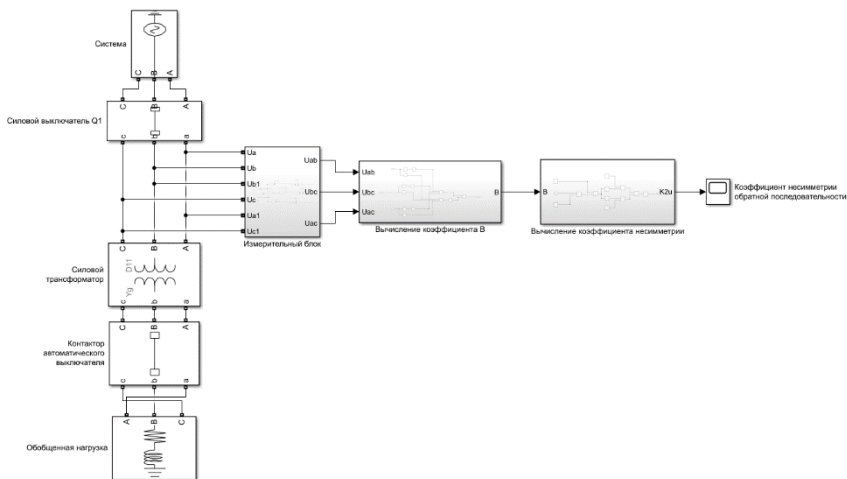


Рис.1. Общий вид системы

Источник питания «Система» симулирует реальную электроэнергетическую систему бесконечной мощности, к которой подключено нефтегазовое предприятие. Задание параметров является важной частью проектирования, так как определяет величину внутреннего сопротивления системы, напряжения, величину токов короткого трехфазного замыкания.

Потребитель электроэнергии «Обобщенная нагрузка» является обобщенной нагрузкой, параметры которой максимально приближены к реальным устройствам.

«Измерительный блок» является подсистемой, в которой производится измерения межфазных напряжений. Результатом измерений является осциллограмма напряжений. Подсистема представлена на рисунке 2.

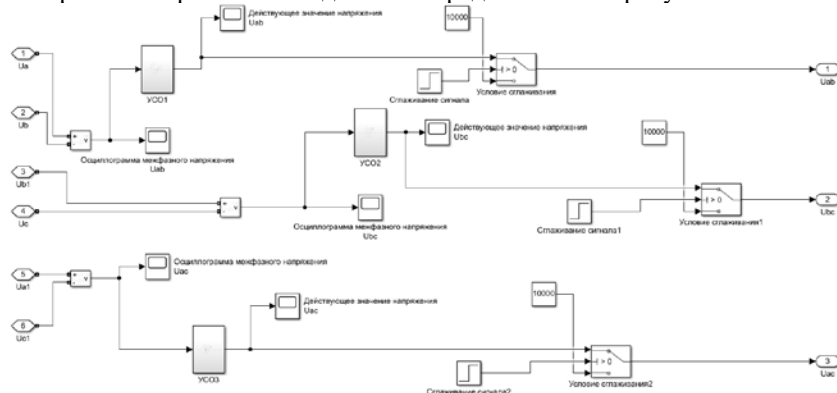


Рис.2. Подсистема «Измерительный блок»

Входными сигналами для данной подсистемы являются фазные напряжения U_a , U_b , U_c . Выходными сигналами являются межфазные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} . Важной функцией, кроме измерения значений межфазных напряжений, является сглаживание сигнала, позволяющая устранить ошибки в программе, связанные с делением на ноль, которые возникают при переходных процессах в момент запуска симуляции.

Подсистема «Вычисление коэффициента В» предназначена для алгебраического вычисления коэффициента β , который используется в формуле (1.2). Входными сигналами для подсистемы являются межфазные напряжения. Выходным сигналом является значение коэффициента β .

Используя значения межфазных напряжений, данная подсистема с помощью алгебраических вычислений посылает сигнал для дальнейших операций. Общий вид подсистемы представлен на рисунке 3.

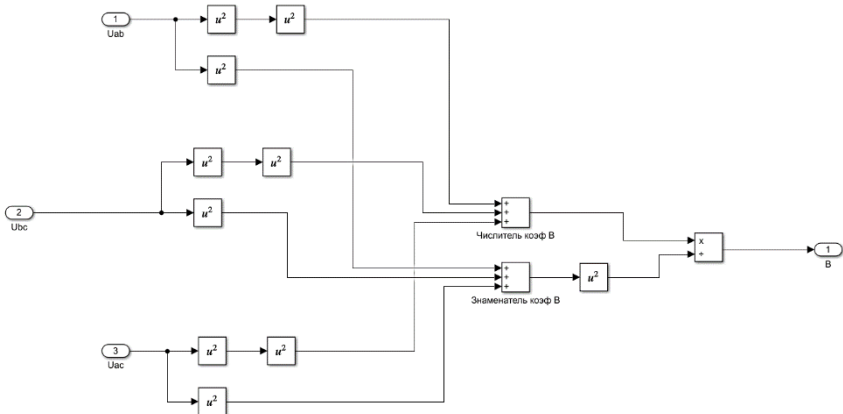


Рис.3. Подсистема «Вычисление коэффициента В»

Следующим шагом является определение значения коэффициента несимметрии обратной последовательности в реальном времени. Для данной операции предназначена подсистема «Вычисление коэффициента несимметрии». Общий вид подсистемы представлен на рисунке 4.

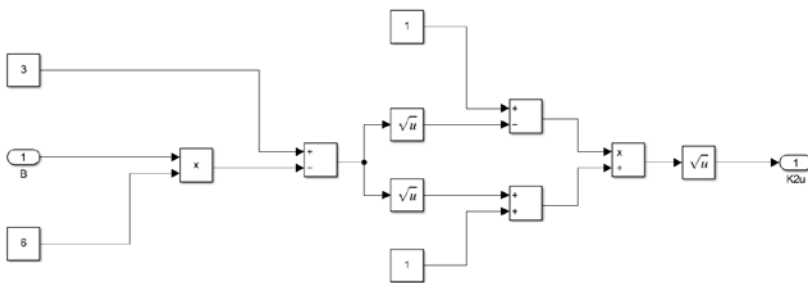


Рис.4. Подсистема «Вычисление коэффициента несимметрии»

Входным сигналом подсистемы является значение коэффициента β . Выходным сигналом является коэффициент несимметрии напряжений обратной последовательности.

3. Анализ работы системы

Для проверки работы системы запущена симуляция продолжительностью в две секунды. Результатом является осциллограмма значения коэффициента несимметрии напряжения обратной последовательности, представленная на рисунке 5.

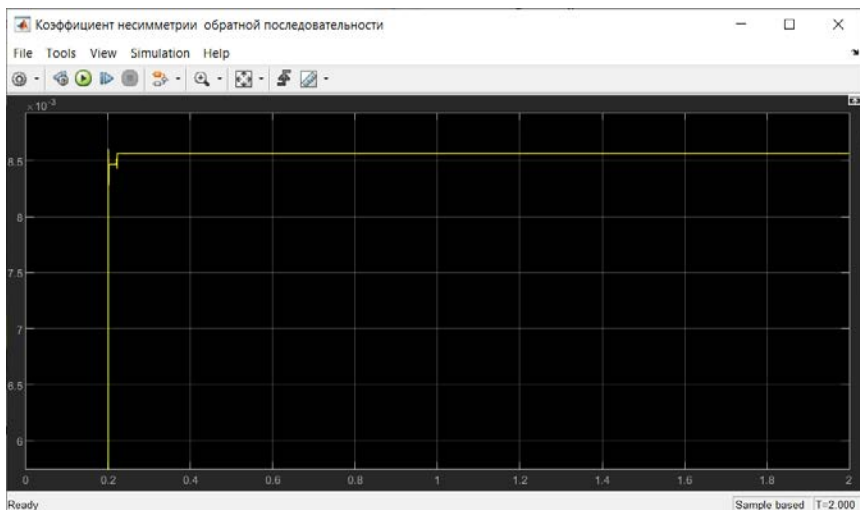


Рис.5. Значение коэффициента несимметрии

Как видно из графика, коэффициент несимметрии составляет $8,563 \cdot 10^{-3}$ относительных единиц, что соответствует 0,8563%. Таким образом, выбранная система удовлетворяет требованиям ГОСТ [1].

Скачок в моменте времени 0,2 секунды является результатом сглаживания, производимого в подсистеме «Измерительный блок». Данный метод позволяет устранить математические ошибки программы, связанные с делением на ноль в подсистеме «Вычисление коэффициента несимметрии».

При изменении параметров питающей сети, которые учитывают реально возникающие в сети возмущения, аварийные режимы работы и несимметрию напряжений в целом, значение коэффициента изменится. Для осуществления подобного рода симуляции необходимо либо изменить угол сдвига фаз, либо изменить значения фазных напряжений в блоке «Система».

Выбранный способ изменения значения фазных напряжений позволяет наглядно увидеть работоспособность системы и вычислить новый коэффициент несимметрии напряжений обратной последовательности. Руководствуясь ГОСТ [1], примем максимальное значение коэффициента равным 2%.

Осциллограмма коэффициента несимметрии для новых значений напряжений представлена на рисунке 6.

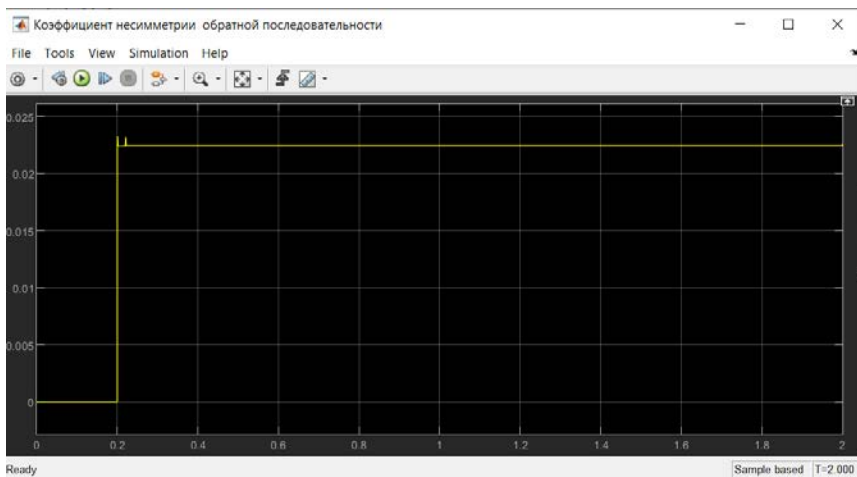


Рис.5. Значение нового коэффициента несимметрии

Анализируя полученный результат, можно увидеть, что значение коэффициента несимметрии стало равным 0,02244 относительных единиц, что соответствует 2,2244%. Данное значение не удовлетворяет требованиям, принятым выше по тексту на основании ГОСТ [1].

Заключение

Разработанная система анализа коэффициента несимметрии напряжений обратной последовательности является цифровым алгоритмом, позволяющим с помощью симулированной электрической сети вычислять значение коэффициента и осуществлять сбор данных о нем в реальное время. Данный алгоритм может лечь в основу оборудования для контроля данного параметра электрических сетей нефтегазовых предприятий, что улучшит их работоспособность, увеличит срок службы и эффективность электротехнического оборудования.

Программный пакет Matlab Simulink позволил точно воссоздать модель реальной электрической сети, а также произвести все необходимые измерения и вычисления. Цифровой алгоритм, разработанный в данном ПО, доказал свою эффективность и соответствие требованиям к системе сбора данных о несимметрии напряжений в трехфазных сетях.

Список литературы

- [1] ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации – Москва: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

- [2] ГОСТ 54149-2010 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии – Москва: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
- [3] Мещеряков, М.О. Модель исследования функционирования токовых защит трансформатора 10/0,4 кВ, используемого в нефтяной промышленности / М.О. Мещеряков, Е.П. Власова, О.Н. Кузяков, Н.В. Лапик // Научно-технический журнал «Автоматизация и информатизация ТЭК». – 2022. – С. 26-33.
- [4] Руди, Д. Ю. Негативное влияние несимметрии и методы их устранения в системе электроснабжения / Д. Ю. Руди, Н. А. Ткачук // В сборнике: Теория и практика современной науки сборник научных трудов по материалам XX Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 87–91.

DEVELOPING OF A DIGITAL ALGORITHM FOR ANALYZING THE STRESS ASYMMETRY COEFFICIENT IN ELECTRICAL SYSTEMS OF OIL AND GAS ENTERPRISES

M.O. Mescheryakov (*maxim.mescheriakov@yandex.ru*)
Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen

Distortion of voltage symmetry leads to negative consequences of the operation of electric networks of oil and gas enterprises. The article develops a digital model designed to analyze the voltage asymmetry coefficient in real time. The model was developed in the MATLAB Simulink software package using simulation of a real electrical network.

Keywords: asymmetry coefficient, modeling, electrical network, electrical system, digital algorithm, reverse sequence, Simulink, Matlab

УДК: 735.29

ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЯЗИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ С ПРИЛОЖЕНИЯМИ УМНОГО ГОРОДА

А.Е. Кудрявцев (*tembich001@mail.ru*)

Липецкий государственный технический университет,
Липецк

В.И. Зацепина (*vizatsepina@yandex.ru*)

Липецкий государственный технический университет,
Липецк

Интеллектуальные сети успешно внедрены в нескольких странах. В Бразилии основным органом, ответственным за широкое внедрение Smart Grid, являются электроэнергетические компании, которые работают на условиях концессии федерального правительства или правительства штата. В этой работе представлена схема совместного использования инфраструктуры связи интеллектуальных сетей с приложениями для "умного города". Такое совместное использование ускорит разработку и внедрение новых приложений, особенно в менее развитых странах или регионах с ограниченными коммуникационными ресурсами. Также в статье представлены предварительные результаты работы существующих интеллектуальных сетей. Результаты показывают, что при использовании только приложения для учета энергии рабочий цикл сети составляет менее 2%. В ходе этой работы будет оценено влияние на общую производительность приложений "умного города", использующих Smart Grid.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть, умный город, интеграция

Введение

Электроэнергетические компании сталкиваются со все более жесткими требованиями к качеству обслуживания и реагируют на это, применяя автоматизацию в сетях передачи и распределения электроэнергии. Это, в свою очередь, подразумевает необходимость наложения сетей передачи данных на существующие электросети, чтобы операторы могли отслеживать состояние в различных точках и выполнять действия для быстрого восстановления обслуживания в случае сбоев. Интеллектуальные сети (SG) были разработаны для обеспечения возможностей непрерывного

мониторинга и реагирования во всех точках, представляющих интерес для сети производства и распределения электроэнергии.

Интеллектуальные сети включают в себя энергетический уровень и коммуникационный уровень [Pedretti, 2020]. Энергетический уровень традиционно включает в себя крупные электростанции (гидроэлектрические, термоэлектрические, атомные, ветряные электростанции, электростанции с фотоэлектрическими панелями, биоперерабатывающие заводы), распределительные сети и различные схемы (линии электропередачи высокого и низкого напряжения, подстанции, трансформаторы, регуляторы напряжения, батареи конденсаторов, устройства защиты и измерения), а также конечные потребители электроэнергии, обычно подключаемые к распределительной сети через счетчик энергии. В настоящее время более мелкие источники электроэнергии также подключены к распределительным сетям или находятся в помещениях потребителей, о чем свидетельствуют солнечные панели и ветряные [Ho, 2013]. Коммуникационный уровень простирается от центров эксплуатации и контроля, которые управляют цепями передачи и распределения, до интеллектуальных электронных устройств (IEDS), установленных вдоль линий электропередачи и подстанций, вплоть до счетчиков энергии и устройств расширенной инфраструктуры учета (AMI) у потребителей. AMI и приборы учета поддерживают дополнительные услуги, предоставляемые энергетическими/коммунальными компаниями. Из-за широкого охвата, как с точки зрения функциональности, так и географии, требуется большое разнообразие технологий.

Конечными точками коммуникационного уровня, “последней милей”, управляемой энергетическими компаниями, являются локальные сети (NAN) [Guo, 2014]. Локальные сети подключают устройства учета и управления к домашней и/или персональной локальной сети (HAN или PAN) на территории клиента. Система SG в Ipiranga реализована с использованием двух коммуникационных уровней: беспроводной сети обратной связи и AMI, которая реализует спецификацию беспроводных интеллектуальных повсеместных сетей (Sun). Схема обратной связи соединяет 21 устройство автоматизации (реклоузеры и регуляторы напряжения, и поддерживает AMI (сборщики данных). Уровень AMI включает в себя 18 устройств сбора данных, 154 маршрутизатора и 5250 интеллектуальных счетчиков.

Спецификация Wi-SUN получает все большее признание в качестве коммуникационного уровня для сетей NAN, не только для сетей SGs или коммунальных служб, но и для “умных городов” и приложений Интернета вещей. Спецификация основана на стандарте IEEE 802.15.4g и продвигается альянсом Wi-SUN Alliance [Saraiva, 2020]. Альянс

опубликовал стандартизированную схему подключения к локальной сети (FAN), которая позволяет подключать устройства разных производителей.

Несмотря на свою нетривиальную стоимость, система Ipiranga SG доказала свою экономическую эффективность благодаря снижению эксплуатационных расходов. Значительная часть полевых операций теперь может выполняться удаленно, что позволяет сократить ежемесячные перемещения автотранспорта сервисной бригады в среднем на ошеломляющие 3750 км и на 41% сократить эквивалентное время перерыва в обслуживании на единицу потребителей [Saleem, 2019]. Кроме того, улучшилось общее качество энергоснабжения, поскольку устройства защиты и повторного включения, управляемые дистанционно, обеспечивают самовосстановление электросети. Поскольку экономическая эффективность Ipiranga SG доказана, имеется некоторая резервная емкость сети (для передачи данных), которая может быть использована для поддержки других классов приложений, в частности, связанных с умными городами и Интернетом Вещей.

1. Обзор системы

Архитектура, которая связывает SG с приложениями Smart City, заключается в следующем. Конечные устройства представляют собой встроенные системы, которые подключаются к существующей инфраструктуре измерения Wi-SUN по радиоканалу. В рассмотренном прототипе серверы приложений умного города и соответствующие базы данных подключены к SG через MQTT Broker. Транспортным протоколом SG является UDP, поэтому протоколы приложений ограничены теми, которые работают с максимальной доставкой сообщений. В качестве прикладного протокола выбран MQTTSN, проект спецификации OASIS, который адаптирует MQTT к сенсорным сетям. Передача телеметрии с очередью сообщений (MQTT) - это протокол прикладного уровня для обмена сообщениями между устройствами, основанный на модели публикации-подписки. MQTT - это простой протокол как с точки зрения реализации, так и с точки зрения (низкой) пропускной способности, что делает его подходящим для встраиваемых приложений Интернета вещей.

Система сбора данных со счетчиков (MDC) - это система управления сбором данных, которая предоставляет функции для интеграции устройств SG с серверами приложений посредством набора веб-сервисов на основе HTTP и двунаправленного интерфейса. Сообщения кодируются в Base64 и инкапсулируются в структуру XML, которая затем передается в виде HTTP-запросов/ответов. Эти HTTP-сообщения передаются только между MDC и серверами приложений и не передаются в SG в виде радиосообщений. В качестве реализации MQTT-SN был выбран шлюз с открытым исходным кодом Eclipse Paho. Поскольку шлюз напрямую не подключен к SG, для

обеспечения надлежащей адресации пакетов данных между шлюзом и устройствами Интернета вещей был использован модуль пересылки MQTT-SN.

2. Предварительная оценка

Уровень обратной связи включает в себя набор радиостанций, работающих в диапазоне 915 МГц со скоростью передачи данных от 125 Кбит/с до 1,25 Мбит/с, использующих двухточечные и многоточечные каналы связи. Уровень Wi-SUN также работает в диапазоне 915 МГц со скоростью передачи данных от 50 до 200 Кбит/с. Модули сбора данных обеспечивают адаптацию интерфейса между двумя уровнями, передавая пакеты данных в/из конечных точек (интеллектуальных счетчиков и других устройств Интернета вещей) и подсистемы MDC. Каждый сборщик данных может обрабатывать до 2000 конечных точек и формировать PAN с режимом переключения каналов, отличным от такового у его соседей, поскольку радиостанции-сборщики используют IEEE 802.15.4e для переключения каналов с временными интервалами (TSCN). Модули маршрутизатора могут обслуживать до 1500 конечных точек, и их функция заключается в уменьшении количества переходов в (физическом) радиоканале [Chhaya, 2018]. Конечными точками являются интеллектуальные счетчики, устройства AMI и прототипы радиочастотных модулей. Эти модули адаптированы для поддержки новых приложений. Для повышения безопасности модули должны быть явно зарегистрированы и сконфигурированы для работы в сети компании. При оценке фактической производительности SG было установлено, что каждый из 18 коллекторов обслуживает от 200 до 700 интеллектуальных счетчиков. Чтобы оценить рабочий цикл сборщика, были собраны средние значения входных (IN) и выходных (OUT) пакетов за день при скорости передачи 200 Кбит/с и 512 байтовых пакетах. Также была измерена средняя задержка пакетов (ping-сообщений).

В своей текущей конфигурации, где используются только устройства AMI, SG Iriqanga отображает рабочие циклы в пределах рекомендованного диапазона. При рабочих циклах менее 2% нужно рассмотреть приложения для "умного города" для повышения эффективности использования. Однако следует учитывать, что низкий уровень использования необходим для сохранения запасов энергии устройства.

Заключение

В данной работе представлена платформа для интеграции приложений smart city и IoT в коммуникационную сеть smart grid. Предварительные данные о производительности показывают, что устройства сбора данных в беспроводной сети, поддерживающей Wi-Fi-SUN, работают с рабочим

циклом менее 2%. Это хороший показатель того, что интеллектуальная сеть может поддерживать новые приложения, помимо учета электроэнергии. Также впоследствии будет оценен рабочий цикл и масштабируемость сети Wi-SUN с помощью новых приложений. Также будут рассмотрены некоторые из известных проблем, таких как длительный период перезапуска сети (передачи данных) после отключения электроэнергии и способы минимизации потерь энергии в приложениях, требующих частых обменов данными.

Список литературы

- [1] A. Pedretti, E. R. d. Silva, E. C. Valerio, J. S. Omori, and T. A. S. ´ Santana, “A Copel e as smart grids,” *O Setor Eletrico ´*, pp. 40–45, dec 2020.
- [2] Q. D. Ho, Y. Gao, and T. Le-Ngoc, “Challenges and research opportunities in wireless communication networks for smart grid,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 89–95, 2013.
- [3] S. Guo, L. He, Y. Gu, B. Jiang, and T. He, “Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 63, no. 11, pp. 2787–2802, 2014.
- [4] F. Saraiva, A. Bispo, R. Gomes, and I. Fonseca, “Avaliac_ao da Confi- ~ abilidade de uma Rede Wi-Sun com Topologia Linear para Aplicac_oes ~ de Cidades Inteligentes,” in *Anais de XXXVIII Simposio Brasileiro de ´ Telecomunicac_oes e Processamento de Sinais ~*. Sociedade Brasileira de Telecomunicac_oes, pp. 22–25.
- [5] Y. Saleem, N. Crespi, M. H. Rehmani, and R. Copeland, “Internet of Things-Aided Smart Grid: Technologies, Architectures, Applications, Prototypes, and Future Research Directions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62 962–63 003, 2019.
- [6] L. Chhaya, P. Sharma, A. Kumar, and G. Bhagwatikar, “IoT-Based Implementation of Field Area Network Using Smart Grid Communication Infrastructure,” *Smart Cities*, no. 1, pp. 176–189, dec.

GRID-CITY: A FRAMEWORK TO SHARE SMART GRIDS COMMUNICATION WITH SMART CITY APPLICATIONS

A.E. Kudryavtsev (*tembich001@mail.ru*)

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

V.I.Zatsepina (*vizatsepina@yandex.ru*)

Lipetsk State Technical University, Lipetsk

Smart grids (SG) have been successfully deployed in several countries. In Brazil, the main agency for the wide(r) SG deployment are the electricity companies that operate under federal or state government concession. This

paper presents a framework for sharing the SG communication infrastructure with smart city applications. This sharing would accelerate the development and implementation of new applications, especially in less developed countries or in regions with scarce communication resources. We present preliminary performance results for an existing SG. Our results indicate that, with only the energy metering application, the network operates with a duty cycle of less than 2%. Our work will assess the impact on overall performance of smart city applications sharing the SG.

Keywords: Smart Grid, Smart City, Integration, Wi-SUN

УДК: 681.532.7

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПИТАНИЕМ ОТ КОМПЛЕКСА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Е.С. Пугин (*egr.sergevich@mail.ru*)

Самарский национальный исследовательский университет,
Самара

Ю.А. Федотов (*feduyuril@rambler.ru*)

Самарский национальный исследовательский университет,
Самара

С развитием добычи нефти и газа появляется множество временных поселений рабочих, которые на данный момент снабжаются электроэнергией от дизельных генераторов. Такой способ электропитания наносит огромный вред окружающей среде. Целью работы является создание системы автоматического управления энергопитанием от комплекса альтернативных источников энергии. Были проанализированы преимущества и недостатки экологически чистых технологий выработки электроэнергии. Спроектирована структурная схема, в которой отображены все ключевые узлы системы энергопитания, даны рекомендации по распределению энергии между источниками.

Ключевые слова: система управления, источник энергии, топливный элемент, альтернативная энергия, ветрогенератор, солнечная панель

Введение

Сфера добычи полезных ископаемых (нефть и природный газ) постоянно развивается. Вблизи месторождений возникают временные поселения рабочих, которые необходимо обеспечивать электроэнергией. На сегодняшний день это достигается благодаря использованию дизельных генераторов, которые наносят огромный вред окружающей среде, вызывая глобальные экологические проблемы. Возникает необходимость замены таких источников энергии альтернативными.

Целью работы является создание системы автоматического управления энергопитанием рабочих поселков от комплекса мобильных экологически чистых источников энергии.

Для проектирования такой системы и грамотного использования выработанной электроэнергии было необходимо проанализировать преимущества и недостатки различных типов экологически чистых источников энергии. За основу были взяты три типа источников, такие как ветрогенераторы, солнечные панели и топливные элементы.

Солнечные панели получили огромное распространение ввиду бесшумности работы, легкости эксплуатации и универсальности применения. Однако для выработки большего количества электроэнергии необходимо задействовать пространство значительных размеров, и это является главным недостатком солнечных станций, другими словами, низкая мощность панелей на квадратный метр.

Вторым по популярности является ветрогенератор. Они производятся разных размеров и конструкций, что позволяет их использовать практически в любых условиях. Для обоих вышесказанных источников энергии общим недостатком является нестабильная во времени выработка электричества, так как метеорологические условия сильно изменчивы. Данная проблема решается введением еще одного источника энергии, такого как топливный элемент.

Топливный элемент – это устройство, вырабатывающее постоянный ток и тепло из богатого водородом топлива путем электрохимической реакции. Первоочередным преимуществом топливного элемента является стабильная выработка электроэнергии. Помимо этого, существует огромное разнообразие топливных элементов, что говорит об универсальности их использования. Элемент выдерживает высокие долговременные перегрузки, а это важное качество источника в системе со сложным, динамическим характером изменения потребляемой энергии.

Большинство недостатков источников энергии устранимы при одновременном использовании их в одной системе. Однако, тогда появляется следующая проблема, нам необходимо организовать такую единую автоматическую систему управления, которая сможет при изменении условий окружающей среды и энергопотребления адаптивно подстраивать свой режим работы.

При стабильном режиме работы система не требует внедрения в ее состав дополнительных элементов, однако, в процессе эксплуатации могут появиться некоторые промежутки времени, когда потребление превышает запланированные значения. Можно разделить пиковые перегрузки на два вида: долговременные(суточные) и кратковременные. Первый тип перегрузки встречается в часы активного использования электрооборудования (утро, вечер). Для решения данной проблемы нужно ввести в систему аккумулятор. Ввиду распространенности и мобильности электрохимических аккумуляторов и было решено использовать именно его. Данный резервный источник питания позволит сгладить

долговременные пики потребления электроэнергии, что позволит снять излишнюю нагрузку с системы и продлить ее срок службы.

К сожалению, топливный элемент и сам аккумулятор не переносят кратковременных пиковых перегрузок. Оба элемента достаточно инертные и не могут быстро реагировать на изменение энергопотребления. Для этого уже долго время в помощь аккумулятору ставят ионистор. Ионистор – конденсатор на основе ионной проводимости, который необходим для кратковременного питания нагрузки большим током. Использование суперконденсатора (ионистора) позволяет сглаживать пики потребления электроэнергии до 10 минут, что вполне достаточно для вывода топливного элемента на режим.

В промежутках между пиковыми нагрузками нужно накапливать генерируемую энергию. Использовать ее излишки можно самым разным способом, например, заряжать аккумулятор и суперконденсатор, либо направлять данную энергию на теплоснабжение или горячее водоснабжение зданий. Для второй цели также может пригодиться топливный элемент, некоторые виды которого бывают высокотемпературными. Самой приоритетной целью выработки электроэнергии является генерация водорода для топливного элемента. Данная технология позволит запасать водород, необходимый для работы топливного элемента, что позволит создать замкнутый цикл производства и потребления энергии.

Если обратить внимание на структурную схему, показанную на рисунке 1, то можно заметить в составе системы инверторы. Данные устройства необходимы для преобразования постоянного тока, вырабатываемого источниками энергии, в переменный. Главная особенность их использования состоит в том, что все они работают синхронно, благодаря чему достигается правильность сложения энергий. Такой режим работы достигается благодаря тактирующим синхроимпульсам, приходящим на инверторы от системы управления.

Наличие в системе нескольких источников энергии усложняет управление ей, однако это позволяет гибко использовать получаемую энергию. Реальные условия размещения поселений или производственных объектов определяют конкретный состав комплексной энергетической установки, однако система управления сохранит свою структуру. Предлагается реализовывать систему в модульном виде. В первую очередь это относится к инверторной технике. Благодаря внешней синхронизации инверторов снимаются проблемы с параллельным включением различных источников энергии. Все вышеперечисленные меры позволяют создать некую обобщенную систему управления для самых разных случаев, а требования к источникам энергии можно будет варьировать в зависимости от погодных условий и величин потребления электроэнергии.

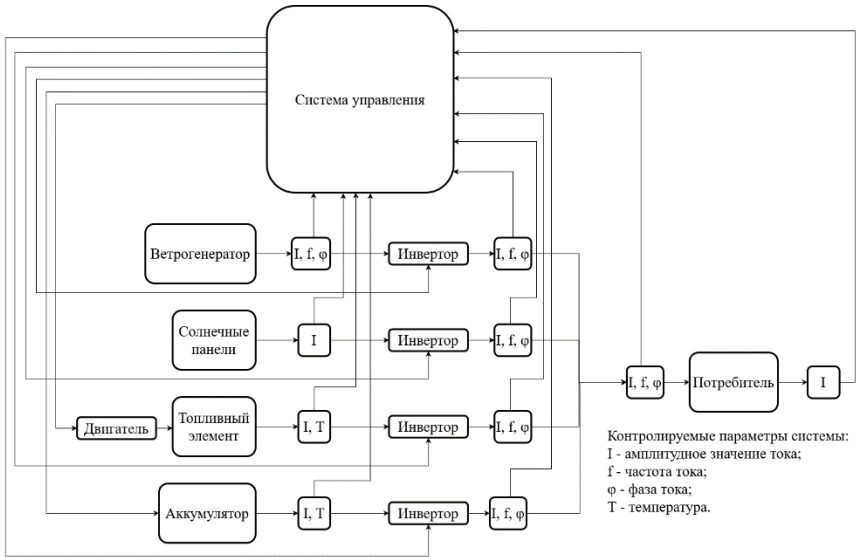


Рис.1. Структурная схема

Предварительный анализ условий размещения генераторов позволил сформировать таблицу примерного рекомендуемого распределения мощностей источников энергии (см. таблицу 1).

Табл. 1.

	Процентный вклад источников электроэнергии		
	Ветрогенераторы	Солнечные станции	Топливные элементы
Лесистая	20	20	60
Болотистая	10	50	40
Равнинная	30	30	40
Гористая	60	10	30
В условиях крайнего севера	Пол.день: 30	35	35
	Пол.ночь:40	0	60

Заключение

В результате исследования определены преимущества и недостатки системы управления энергопитанием от комплекса альтернативных источников энергии, даны рекомендации по распределению электроэнергии между источниками.

В настоящее время разработано множество мероприятий для снижения негативного воздействия выработки электроэнергии на окружающую среду, однако, ситуация улучшается незаметно, а это значит, необходимо продолжать разработку новых технологий, совершенствовать и модернизировать существующие меры, которые позволят вырабатывать энергию более экологично и безопасно.

Список литературы

- [1] Опытный образец электросетевого контроллера для управления просьюмерами в распределительной электрической сети / В. О. Акуличев, В. Ю. Кононенко, М. Е. Коржавин, П. А. Косов. — Текст : непосредственный // Энергия единой сети. — 2024. — № 1. — С. 66-72.

THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF ENERGY SUPPLY FROM THE COMPLEX OF ALTERNATIVE ENERGY

E.S. Pugin (*egr.sergevich@mail.ru*)

Samara university, Samara

Y.A. Fedotov (*fedyuri1@rambler.ru*)

Samara university, Samara

With the development of oil and gas production, many temporary settlements of workers appear, which are currently supplied with electricity from diesel generators. This method of power supply causes great harm to the environment. The aim of the work is to create a system for automatic control of energy supply from a complex of alternative energy sources. The advantages and disadvantages of environmentally friendly power generation technologies were analyzed. A block diagram has been designed, which displays all the key components of the power supply system. An algorithm for the operation of this system was also developed and recommendations were given on the distribution of energy between sources.

Keywords: control system, energy source, fuel cell, alternative energy, wind turbine, solar panel

УДК: 621.314

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ БЛОКА СИНТЕТИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ КАК ЧАСТИ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В СЛАБОЙ СЕТИ¹

Я.Ю. Малькова (*yapower@tpu.ru*)

П.П. Радько (*ppr1@tpu.ru*)

Томский политехнический университет, Томск

В работе приведены результаты внедрения блока синтетической инерции в структурную схему виртуального синхронного генератора в условиях работы в слабой сети. Доказано положительное влияние данного синтеза принципов реализации системы управления на переходные процессы. Продемонстрирована важность правильной настройки блока синтетической инерции: за счет нахождения оптимальных значений коэффициентов удалось улучшить качество процесса регулирования частоты на 27,06%.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция, виртуальный синхронный генератор, синтетическая инерция.

Введение

В последние годы в мировой электроэнергетике наблюдается тренд к частичному переходу на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Наша страна не стала исключением. Согласно программе ДПМ ВИЭ 2.0 [Бутузов, 2022], вплоть до 2035 года предполагается планомерное увеличение установленной мощности – количества объектов и их единичной мощности, возобновляемой генерации.

Стоит отметить, что несмотря на положительное влияние частичной замены традиционной генерации на ВИЭ на состояние экологической обстановки имеет место и ряд особенностей данного процесса. Так, реализуемый способ подключения возобновляемой генерации к сети обуславливает снижение постоянной инерции, а также ограниченное участие данных объектов в процессах регулирования режимных параметров – напряжения и частоты.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00004

Для нашей страны характерно наличие энергорайонов, работающих в автономном или же изолированном режиме. Здесь, как правило, имеются в виду расположенные в труднодоступных местах промышленные объекты или же осваиваемые месторождения полезных ископаемых. При наличии в составе генерирующего оборудования объектов ВИЭ возникающие в сети возмущения могут привести к резкому изменению режимных параметров, что, в свою очередь, является предпосылкой для возникновения тяжелых системных аварий и нарушения устойчивости сети.

Решением обозначенной выше проблемы является соответствующая настройка системы автоматического управления (САУ) сетевым инвертором напряжения, через который осуществляется подключение объекта ВИЭ к сети. Данная настройка позволяет возобновляемой генерации не только с достаточной эффективностью преобразовывать энергию ВИЭ: энергию ветра и солнца, в электрическую, но и принимать участие в процессах регулирования режимных параметров.

В настоящее время получили распространение следующие САУ сетевым инвертором объекта ВИЭ: на основе виртуального синхронного генератора (ВСГ) [Суворов и др., 2022] и традиционная САУ, включающая в свой состав блок синтетической инерции (СИ) [Разживин и др., 2022].

Так, САУ на основе ВСГ является достаточно сложной САУ, имитирующей поведение традиционной синхронной машины, на программно-аппаратном уровне (рис. 1).

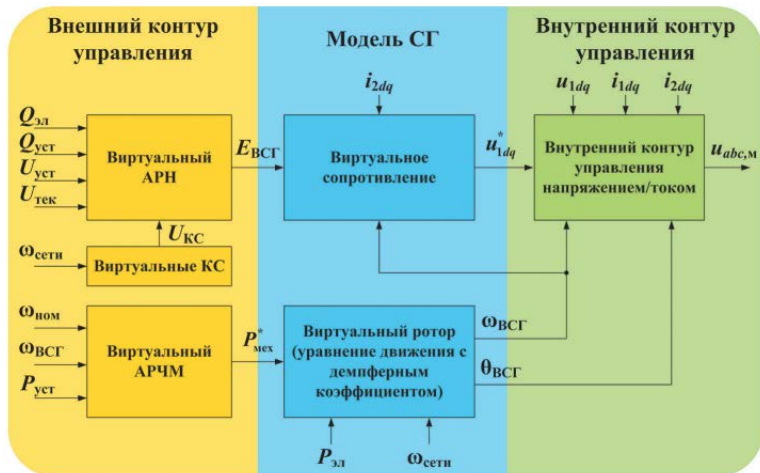


Рис. 1. Классическая структура ВСГ, управляемого по напряжению (ВСГ-Н)

В то же время, САУ с блоком СИ, структурная схема которой приведена ниже, на рис. 2, осуществляет реагирование объекта генерации на изменение частоты в более упрощенном виде.

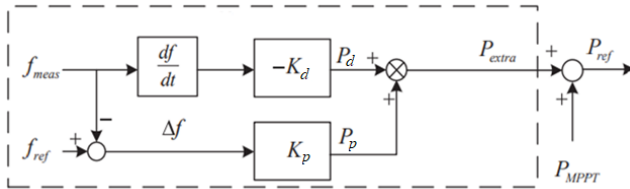


Рис. 2. Структурная схема блока СИ

Данная работа посвящена проведению экспериментов, целью которых являлось объединение обозначенных выше способов реализации САУ сетевым инвертором объекта ВИЭ, и анализу полученных результатов с точки зрения влияния на динамическую устойчивость исследуемого энергорайона с объектом ВИЭ, на примере солнечной электростанции (СЭС). Кроме того, в рамках работы была проведена оценка влияния настроек блока СИ на протекание переходных процессов для случая совместной работы данного блока с ВСГ.

1. Рассматриваемая схема

Исследуемый энергорайон приведен на рис. 3 и представляет собой одномашинную систему.

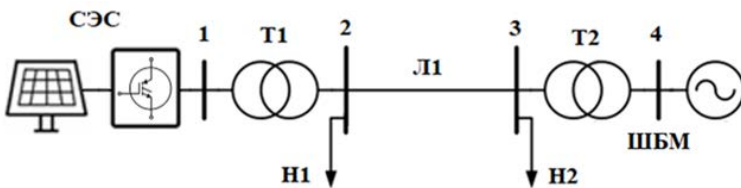


Рис. 3. Схема исследуемого энергорайона

Здесь, шина 4 – шина бесконечной мощности (ШБМ). Это обусловлено тем, что при моделировании таких регуляторов как автоматическое регулирование частоты и активной мощности (АРЧМ) и автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) возможно появление дополнительных колебаний, связанных с работой самих регуляторов.

Также стоит отметить, что линия Л1 длинная настолько, что исследуемая сеть считается слабой. Для корректной работы блока СИ осуществлена разгрузка фотоэлектрической установки на 10%.

Исследование проведено с использованием программно-аппаратного комплекса RSCAD/RTDS.

2. Результаты экспериментов при объединении ВСГ и блока СИ

На рис. 4 приведены осциллограммы изменения частоты после изменения (увеличения) нагрузки в слабой сети на 4 МВт.

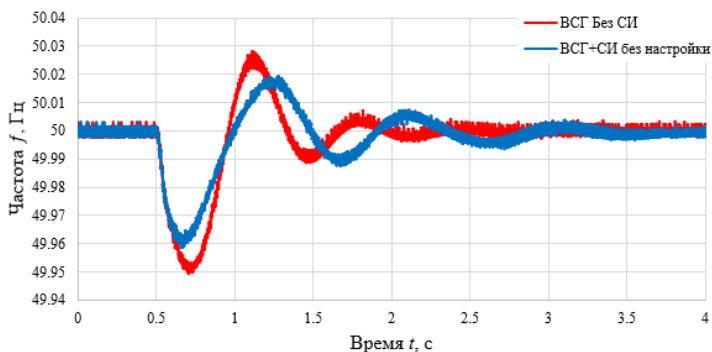


Рис. 4. Осциллограммы изменения частоты после изменения нагрузки в слабой сети

Из рис. 4 видно, что скорость изменения частоты при внедрении блока СИ осталась неизменной, предельные отклонения частоты в первом и во втором полупериоде уменьшились, в то время как демпфирующие свойства ухудшились. Данное влияние можно объяснить инертностью САУ: из-за аperiodических звеньев сигнал на увеличение мощности после появления небаланса приходит не сразу, что теоретически может быть решено более точной настройкой блока СИ.

3. Результаты настройки блока СИ в составе ВСГ

Минимизировать эффект ухудшения демпфирующих свойств можно с использованием блока СИ, посредством осуществления регулирования (настройки) коэффициентов K_d и K_p (см. рис. 1).

Согласно рис. 1, коэффициент K_d определяет влияние дифференцирующего контура, реагирующего на скорость изменения частоты. В то время как коэффициент K_p определяет работу пропорционального контура, реагирующего на отклонения частоты от номинального значения.

Поскольку коэффициентов только два, оптимальным способом настройки блока СИ в данном случае является наблюдение за изменением режимных параметров через серию экспериментов, с разным набором параметров.

Первоначальные настройки блока СИ, а также наиболее подходящие настройки, установленные опытным путем, приведены ниже, в табл. 1.

Табл. 1.

K_d до настройки	K_d после настройки	K_p до настройки	K_p после настройки
10	10	300	100

Результаты проведенных экспериментов с учетом наиболее подходящих – оптимальных, настроек блока СИ в слабой сети приведены на рис. 5.

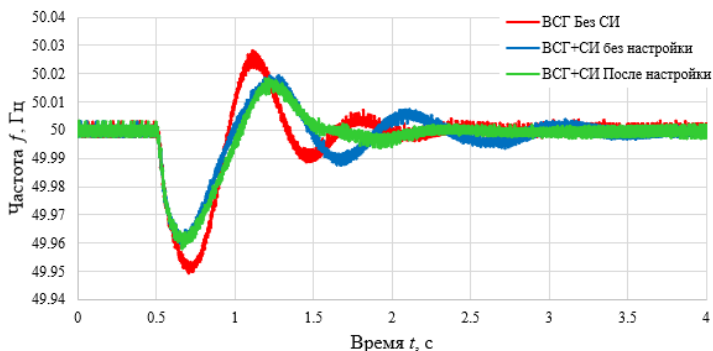


Рис. 5. Оциллограммы изменения частоты после изменения нагрузки в слабой сети с учетом настройки блока СИ

Из рис. 5 видно, что удалось не только устранить ухудшение демпфирующих свойств, но и значительно улучшить процесс демпфирования.

4. Количественное сравнение

Количественное сравнение результатов применения САУ на основе ВСГ и на основе ВСГ с блоком СИ в слабых сетях при оптимальных настройках блока СИ и без них приведено в табл. 2.

Анализ проводится посредством расчета квадратичного интегрального показателя качества I (формула 4.1). Данный показатель позволяет оценить среднее отклонение частоты от номинального значения на протяжении всего переходного процесса. Отметим, что чем меньше значение интегрального показателя качества, тем лучше:

$$I = \int_{t=0,5}^{T=t_{зад}=4} t^2 \cdot x^2(t) dt, \quad (4.1)$$

где $x(t)$ – отклонение значения частоты от его установившегося значения после возмущения; t – момент начала переходного процесса; $t_{зад}$ – момент

окончания переходного процесса; I – квадратичный интегральный показатель по квадрату времени и квадрату ошибки.

Табл. 2.

Система управления Плотность сети	$I(\text{ВСГ}), \text{о.е.}$	$I(\text{ВСГ} + \text{СИ без настройки}), \text{о.е.}$	$I(\text{ВСГ} + \text{СИ после настройки}), \text{о.е.}$
		Улучшение относительно ВСГ, %	Улучшение относительно ВСГ, %
Слабая сеть	$14,26 \cdot 10^{-5}$	$12,54 \cdot 10^{-5}$	$9,15 \cdot 10^{-5}$
		12,09	27,06
			35,88

Заключение

На основании проведенных экспериментов и анализа полученных результатов можно сделать вывод, что применение блока СИ в составе ВСГ оказывает положительное влияние на динамическую устойчивость энергосистемы, уменьшая предельное отклонение частоты после возмущений в слабой сети.

Однако стоит отметить, что неправильная или же недостаточная настройка блока СИ может привести к ухудшению демпфирующих свойств. Оптимальные настройки блока СИ позволяют избежать данного негативного влияния на устойчивость энергосистемы, улучшая качество переходного процесса относительно САУ на основе ВСГ без блока СИ вплоть до 35,88%.

Таким образом, если имеет место потенциальная возможность разгрузки СЭС и необходимо обеспечить более устойчивую работу исследуемого энергорайона после возмущений того или иного рода, применение САУ на основе ВСГ совместно с блоком СИ является весьма перспективным решением, не требующим значительных капитальных затрат.

В дальнейшей работе планируется воспроизведение математической модели САУ в пространстве состояний, что позволит, в свою очередь, провести анализ влияния большего числа отдельных переменных (в т.ч. и коэффициентов ВСГ) на переходные процессы.

Список литературы

- [1] Бутузов, В. А. Возобновляемая энергетика России: результаты 2020 г / В. А. Бутузов // Энергия единой сети. – 2022. – № 1(62). – С. 42-51. – EDN ТВYYQH.
- [2] Система автоматического управления силовым преобразователем на основе свободно конфигурируемой структуры виртуального синхронного генератора / А. А. Суворов, А. Б. Аскарлов, М. В. Андреев [и др.] // Электричество. – 2022. – № 4. – С. 15-26. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-4-15-26. – EDN QLMNUD.
- [3] Исследование влияния синтетической инерции на динамическую устойчивость электроэнергетических систем / И. А. Разживин, А. А. Суворов, М. В. Андреев [и др.] // Электричество. – 2022. – № 8. – С. 16-26. – DOI 10.24160/0013-5380-2022-8-16-26. – EDN UHWOBV.

OPTIMIZATION OF SYNTHETIC INERTIA UNIT OPERATION AS A PART OF VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR IN A WEAK NETWORK

Y.Y. Malkova (*yapower@tpu.ru*)

P.P. Radko (*ppr1@tpu.ru*)

Tomsk Polytechnic University, Tomsk

The paper presents the results of implementation of the synthetic inertia unit in the structural scheme of a virtual synchronous generator under conditions of operation in a weak network. The positive influence of this synthesis of the principles of control system realization on the transient processes is proved. The importance of proper tuning of the synthetic inertia unit is demonstrated: by finding the optimal values of coefficients it was possible to improve the quality of the frequency control process by 27.06%.

Keywords: renewable energy sources, solar power plant, virtual synchronous generator, synthetic inertia.

УДК: 621.31

МЕТОДИКА ЦИФРОВОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Н. Шилин (*eltech@vstu.ru*)

Н.С. Кузнецова (*artex23@yandex.ru*)

Д.Т. Нго (*ndtvstu@gmail.com*)

Волгоградский государственный технический университет, г.
Волгоград

В настоящее время при цифровизации электроэнергетики возникает проблема разработки цифровых моделей оборудования и устройств электроэнергетических систем. Цифровые модели являются основой для проектирования и выбора цифровых устройств и систем контроля, диагностики и управления электроэнергетических систем. Особенно эта проблема актуальна в связи с внедрением интеллектуальных электрических систем (*Smart Grid*). Теоретической основой цифрового моделирования систем управления является z -преобразование, важным свойством которого является возможность нахождения оригинала функции с помощью разложения дробной рациональной функции изображения в ряд Лорана по убывающим степеням z . Однако этому методу присущ недостаток - в качестве исходной информации для определения изображений также используются математические уравнения. В тоже время основной математической моделью электромеханических и электронных устройств являются их схемы замещения. Поэтому для удобства цифрового моделирования электрических схем разработан операторно-дискретный метод, позволяющий получить разностные уравнения непосредственно по схеме замещения. В статье приведены также рекомендации по выбору периода дискретизации и максимальной степени передаточной функции, которые обеспечивают необходимую точность.

Ключевые слова: Smart Grid, цифровая энергетика, цифровое моделирование энергетических систем, Z -моделирование, метод z – форм, операторно-дискретный метод.

Введение

В связи с внедрением интеллектуальных электрических систем проблем (*Smart Grid*) возникает необходимость цифрового моделирования основного оборудования и устройств электроэнергетических систем. Обычно цифровые модели разрабатываются по аналоговым моделям, причем для моделирования динамических процессов используются дифференциальные уравнения. Разработка дифференциальных уравнений реальных технических систем является довольно сложной задачей. Методу решения дифференциальных уравнений присущи следующие недостатки: невозможность аналитического вычисления интеграла для некоторых математических выражений и трудоемкость решение задачи для систем с несколькими устройствами. В операторном методе, основанном преобразовании Лапласа, решение дифференциальных уравнений [Бессонов, 1978] упрощается, но получение исходных уравнений является сложной задачей. Теоретической основой цифровых систем управления является z -преобразование, важным свойством которого является возможность нахождения оригинала функции с помощью разложения дробной рациональной функции изображения в ряд Лорана по убывающим степеням z . Метод z -преобразования был разработан для моделирования импульсных систем, в котором используется временная дискретизация, а значение дискретизируемой функции представляется в аналоговой форме. Z -преобразование позволяет эффективно решать довольно широкий круг задач: линейных, нелинейных, дискретных, непрерывных, с переменными параметрами и изменяющейся структурой, с параметрическими обратными связями, со звеньями запаздывания [Куо, 1986]. Однако этому методу присущ недостаток - в качестве исходной информации для определения изображений также используются математические уравнения. В тоже время основной математической моделью электромеханических и электронных устройств являются их схемы замещения. Причем из схем замещения можно получить дифференциальные уравнения и это удобно для случая, если принципиальные схемы и схемы замещения получены в результате лабораторных исследований и опыта эксплуатации. Поэтому для удобства цифрового моделирования электрических схем разработан операторно-дискретный метод, позволяющий получить разностные уравнения непосредственно по схеме [Шилин, 2000].

Операторно-дискретный метод

Любая сложная электрическая схема представляет собой соединение ветвей с элементами и источниками. Поэтому для ветви, содержащей источник ЭДС - $e(t)$, элементы R , L , и C и имеющей начальные условия ($i(0)$, $u_c(0)$) (рис. 1, а), получено Z -изображение дискретизированного

уравнения ветви и выражение закона Ома в операторно-дискретной форме

$$I(z) = \frac{U_{ab}(z) + E(z) + E_{BH}(z)}{Z(z)}, \quad (1)$$

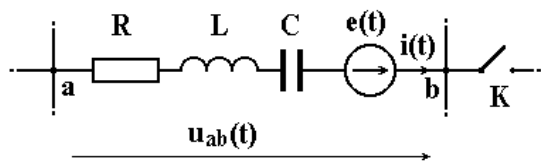
где $Z(z) = R + L \frac{z-1}{T} + \frac{zT}{(z-1)C}$ - операторно-дискретное

сопротивление ветви;

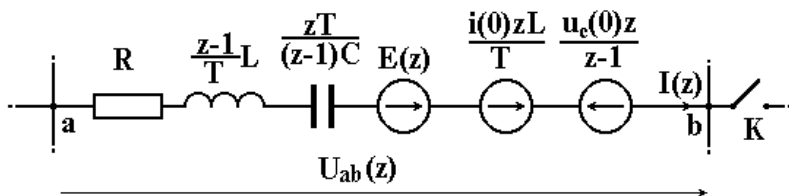
$E_{BH}(z) = \frac{Lzi(0)}{T} - \frac{u_c(0)z}{z-1}$ - изображение внутренних источников

ЭДС, введение которых обусловлено запасом энергии в реактивных элементах цепи; T - период дискретизации.

Уравнению (1) соответствует схема замещения ветви (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1

С помощью полученных выражений (1) может быть определена импульсная передаточная функция электронного устройства непосредственно по схемам замещения

$$W(z) = \frac{U_{BBLX}(z)}{U_{BX}(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_h z^{-h}}. \quad (2)$$

Для нахождения реакции на входное воздействие в тактовые моменты времени может быть использовано разностное уравнение

$$u_{BBLX}[n] = \sum_{k=0}^m a_k u_{BX}[n-k] - \sum_{k=1}^h b_k u_{BBLX}[n-k], \quad (3)$$

коэффициенты которого определяются непосредственно по уравнению без вычислений.

Переход от изображения к оригиналу функции - уравнениям состояния может быть выполнен по диаграмме состояния. Определяя в качестве переменных состояния выходные сигналы узлов всех элементов задержки и применяя формулу Мезона, можно получить уравнения динамики и переходное уравнение состояния непосредственно из диаграммы состояния. Для этого по уравнению передаточной функции составляется диаграмма состояния, а затем из нее исключаются элементы задержки - z^{-1} и осуществляется переход с помощью формулы Мезона к уравнениям состояния системы. Так, например, передаточной функции с $m=h=4$ соответствует диаграмма состояния (рис.2)

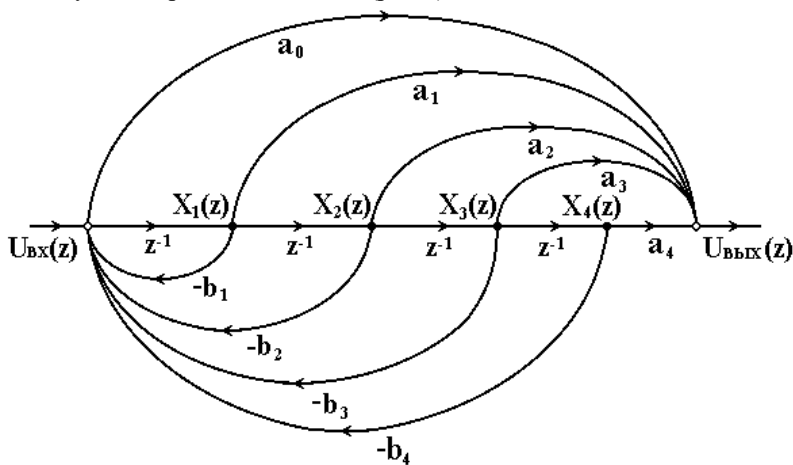


Рис. 2

После исключения блоков задержки - z^{-1} из диаграммы состояния (рис.2) получены уравнения состояния и выходного сигнала (рис. 3)

$$\begin{aligned}
 x_1[n+1] &= -b_1x_1[n] - b_2x_2[n] - b_3x_3[n] - b_4x_4[n] + u_{\text{вх}}[n]; \\
 x_2[n+1] &= x_1[n]; \\
 x_3[n+1] &= x_2[n]; \\
 x_4[n+1] &= x_3[n]
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$u_{\text{вых}}[n] = a_0x_1[n+1] + a_1x_1[n] + a_2x_2[n] + a_3x_3[n] + a_4x_4[n] \tag{5}$$

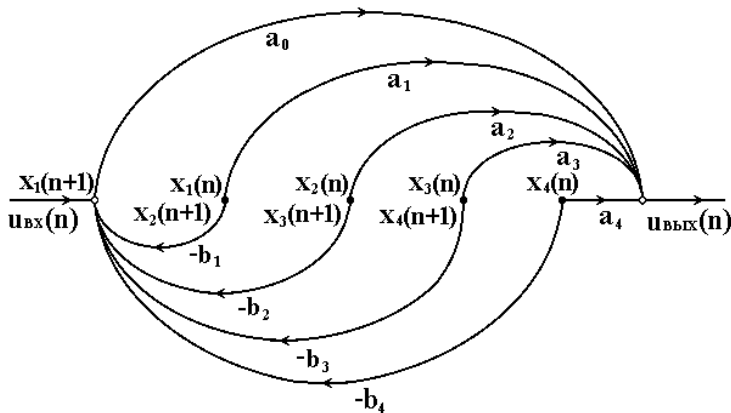


Рис. 3

Методики моделирования

Диаграмма состояния импульсной передаточной функции устройства совпадает со структурой цифрового фильтра, реализующего эту задачу. Диаграмме состояния (рис. 2) соответствует структурная схема цифрового фильтра (рис. 4). Это свойство может быть использовано при замене аналоговых устройств цифровыми фильтрами, т.е. при модернизации систем управления. Синтез цифровых устройств по аналоговым моделям является весьма актуальной задачей, поскольку существует большое число научных разработок в различных отраслях техники в виде принципиальных электрических схем или схем замещения. В настоящее время существуют методики определения точности цифровой фильтрации. Эта методика использовалась при проектировании цифрового корректирующего фильтра для оптоэлектронного измерительного преобразователя.

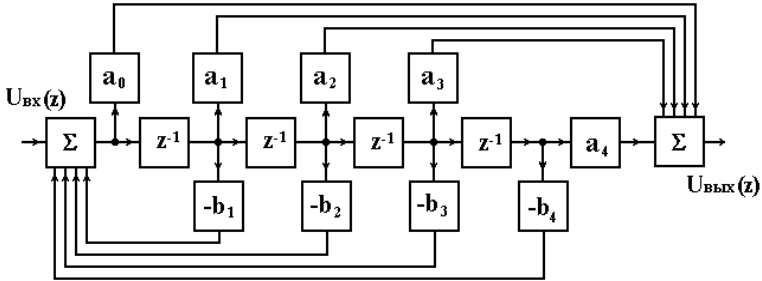


Рис. 4

Рассмотрим пример синтеза ПИД – регулятора, выполненного на базе операционной схемы операционного усилителя (рис. 5):

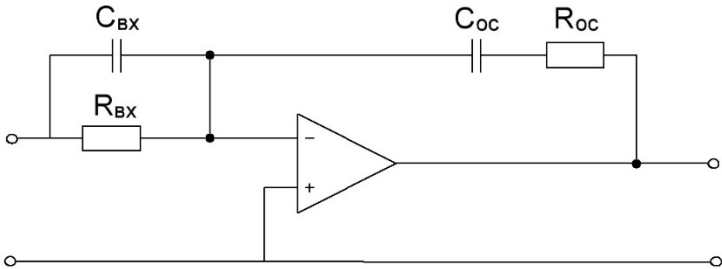


Рис. 5

Передаточная функция аналогового ПИД - регулятора имеет следующее выражение:

$$H(p) = \frac{\left(R_{oc} + \frac{1}{p \cdot C_{oc}}\right) \left(R_{вх} + \frac{1}{p \cdot C_{вх}}\right)}{\left(R_{вх} \cdot \frac{1}{p \cdot C_{вх}}\right)} \quad (5)$$

Перейдем к z-форме, путем замены оператора p методом обратной разности:

$$p = \frac{z - 1}{zT} = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (6)$$

$$H(z) = \frac{-3 \cdot 10^{-6} \cdot z^{-2} + 152 \cdot 10^{-3} \cdot z^{-1} - 1,0015 \cdot 10^2}{1 - z^{-1}}$$

Передаточная дискретная функция ПИД – регулятора имеет вид общий вид:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}{1 + b_1 \cdot z^{-1}} \quad (7)$$

$$a_0 = -1,0015 \cdot 10^2$$

$$a_1 = 152 \cdot 10^{-3}$$

$$a_2 = -3 \cdot 10^{-6}$$

$$b_1 = -1$$

Таким образом, получены численные значения коэффициентов структурной схемы ПИД регулятора.

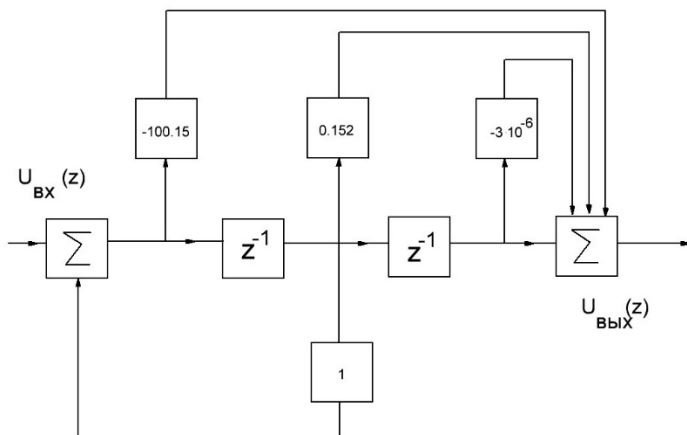


Рис. 6 – Структурная схема

Выводы: Данный метод позволяет сравнительно просто проектировать цифровой фильтр по аналоговой электрической схеме замещения без промежуточных вычислений, а поскольку процесс полностью формализован, то, следовательно, может быть и автоматизирован. Особенно этот метод позволит ускорить процесс цифровизации в энергетике, поскольку в аналоговых схемах накоплен большой объем экспериментальных и опытных исследований.

Список литературы

- [1] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
- [2] Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. - М.: Машиностроение, 1986.
- [3] Шилин А.Н. Операторно-дискретный метод анализа электрических цепей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000. - № 7. - С. 50-56.

METHODOLOGY FOR DIGITAL MODERNIZATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.N. Shilin (*eltech@vstu.ru*)
N.S. Kuznetsova (*artex23@yandex.ru*)
D.T. Ngo (*ndtvstu@gmail.com*)
Volgograd State Technical University, Volgograd

Currently, with the digitalization of the electric power industry, the problem of developing digital models of equipment and devices of electric power systems arises. Digital models are the basis for the design and selection of digital devices and systems for monitoring, diagnostics and management of electrical power systems. This problem is especially relevant in connection with the introduction of intelligent electrical systems (Smart Grid). The theoretical basis for digital modeling of control systems is the z-transform, an important property of which is the ability to find the original function by expanding the fractional rational function of the image into a Laurent series in decreasing powers of z. However, this method has a drawback - mathematical equations are also used as input information for identifying images. At the same time, the main mathematical model of electromechanical and electronic devices is their equivalent circuits. Therefore, for the convenience of digital modeling of electrical circuits, an operator-discrete method has been developed that allows one to obtain difference equations directly from the mixing scheme. The article also provides recommendations for choosing the sampling period and the maximum degree of transfer function that provide the necessary accuracy.

Keywords: Smart Grid, digital energy, digital modeling of energy systems, Z-modeling, z-form method, discrete operator method.

УДК: 004.67

МЕТОДИКА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Д. Моргоева (*m.angelika-m@yandex.ru*)

Научный руководитель: д.т.н., проф. Р.В. Ключев
(*kluev-roman@rambler.ru*)

Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет),
Владикавказ

В работе представлены результаты исследований по прогнозированию суточных графиков электропотребления промышленного предприятия. Была разработана методика краткосрочного прогнозирования электропотребления предприятия, предназначенная для внедрения в автоматизированную систему диспетчерского управления электропотреблением. При разработке методики была проведена серия эмпирических исследований по созданию и оптимизации прогностических моделей электропотребления, в качестве методов исследования были использованы нейросетевые архитектуры и алгоритмы классического машинного обучения, а также метод декомпозиции временных рядов на аддитивные составляющие.

Ключевые слова: прогнозирование, искусственный интеллект, машинное обучение, градиентный бустинг, нейронные сети.

Введение

Цифровая трансформация электроэнергетики во многом определяет вектор развития электроэнергетических систем (ЭЭС). Для промышленных предприятий инвестиции во внедрение цифровых решений для ЭЭС позволяют увеличить рентабельность производства. Достижение окупаемости внедренных технологий зависит в том числе от уровня автоматизации технологических процессов и производств.

В данной работе рассмотрено энергоемкое промышленное предприятие, являющееся субъектом оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). Предприятие является большой сложной системой со сложными технологическими и энергетическими связями между структурными подразделениями. Производство предприятия непрерывное, уровень загрузки производственных подразделений и объем выпуска продукции неравномерный. Как субъекту ОРЭМ предприятию необходимо планировать электропотребление на сутки вперед. Наличие цифровых приборов учета электрической энергии, функционирующих в рамках автоматизированной информационно измерительной системы учета и контроля электроэнергии (АИИС КУЭ), позволяет получать данные об электропотреблении в разрезе отдельных подразделений и предприятия в целом. Эти данные можно анализировать с помощью различных методов и создавать прогностические модели. Наличие прогноза позволит лицу, принимающему решение, более обоснованно планировать электропотребление.

Прогнозирование электропотребления достаточно разработанная тема исследования, насчитывает множество научных публикаций начиная с 20-х годов прошлого века [1]. Актуальность данного направления в настоящее время обусловлена множеством причин, среди которых можно выделить концепцию ценозависимого потребления электроэнергии, предполагающую создание экономически выгодных условий для всех участников ОРЭМ. Децентрализация производства электроэнергии, внедрение цифровых решений в производственные и электроэнергетические системы, обработка данных полученных с их помощью, развитие методов интеллектуального анализа данных – все это способствует повышению оперативности и обоснованности принимаемых человеком решений, что и обуславливает актуальность исследований в области прогнозирования электропотребления.

Методы, предлагаемые исследователями, довольно разнообразны. Анализ публикаций за последние 5 лет позволяет отметить, что ключевыми перспективными технологиями среди научного сообщества являются технологии нейросетевого моделирования [2]. Исследователи применяют искусственные нейронные сети в том числе в составе гибридных моделей прогнозирования, которые включают несколько методов анализа данных, такие как, например, вейвлет-анализ, сингулярный спектральный анализ, сезонное разложение временных рядов на основе локально взвешенного сглаживания диаграммы рассеяния (seasonal decomposition of time series by Loess – STL) и ряд других. Однако для каждого конкретного объекта выбор метода, настройка параметров производится индивидуально. Нет единых методологических рекомендаций по применению какого-либо метода как универсального. Обусловлено это прежде всего вариативностью условий

функционирования объекта, особенностями протекающих в нем технологических и производственных процессов, оставляющий характерный след в графиках электрических нагрузок этого объекта и рядом других факторов, многие из которых не поддаются формализованному представлению, что вызывает сложности в их учете при прогнозировании.

Целью данной работы является выполнение исследований, направленных на формирование рекомендаций по выбору и созданию моделей прогнозирования электропотребления промышленного предприятия для повышения эффективности функционирования этого предприятия. Для достижения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие задачи:

1. Анализ графиков электрических нагрузок.
2. Проведение декомпозиции временных рядов электропотребления для выявления тренда и сезонности в данных.
3. Обоснование структуры модели для прогнозирования электропотребления по результатам выполнения п.1-2.
4. Создание прогностических моделей, подбор гиперпараметров, оптимизация и сравнительный анализ результатов.

Конечным результатом выполнения указанных задач является объединение этапов выполнения исследования для наилучшей из рассмотренных моделей прогнозирования в методику краткосрочного прогнозирования электропотребления.

Этапы выполнения исследований и их результаты

Исходный набор данных представляет собой почасовые значения электропотребления предприятия за 2021 год. В результате анализа графиков электропотребления, представленных на рисунке 1, можно отметить, что характер электропотребления неравномерный в течение года и в течение часов отдельных суток.

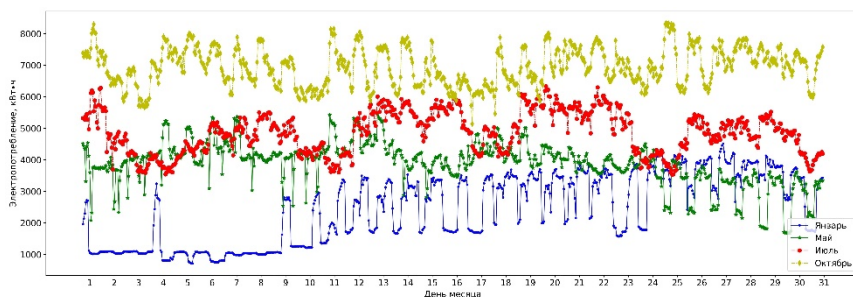


Рис. 1. Графики электропотребления предприятия за 2021 год

Исходный набор данных был дополнен календарными признаками (квартал, месяц, день, день недели, час) и ретроспективными (лагами) значениями электропотребления (ЭП сутки назад). Для каждой пары признаков и целевой переменной был вычислен коэффициент корреляции Пирсона. Представленная на рисунке 2 матрица корреляции позволяет отметить, что наиболее сильное влияние оказывают признаки-лаги целевой переменной, причем чем ближе по времени к целевой переменной лаг, тем больше сила линейной связи с целевым результатом. Из-за мультиколлинеарности было принято решение оставить в модели только значения электропотребления 24 часа назад (lag_1) как наиболее сильно связанную с целевой переменной (Load). Стоит отметить, что в результате корреляционного анализа была выявлена линейная зависимость между номером месяца, кварталом и величиной электропотребления. Поэтому далее ряд электропотребления был исследован с помощью алгоритма сезонного разложения временных рядов с помощью локальной регрессии.

Load	1	0.93	0.88	0.85	0.84	0.84	0.86	0.88	0.76	0.79	0.044	-0.13	0.025
lag_1	0.93	1	0.93	0.88	0.86	0.85	0.84	0.86	0.77	0.8	0.077	0.031	0.024
lag_2	0.88	0.93	1	0.93	0.88	0.86	0.85	0.85	0.78	0.81	0.093	0.13	0.023
lag_3	0.85	0.88	0.93	1	0.93	0.89	0.86	0.85	0.78	0.82	0.11	0.077	0.023
lag_4	0.84	0.86	0.88	0.93	1	0.93	0.89	0.87	0.79	0.82	0.12	0.0044	0.023
lag_5	0.84	0.85	0.86	0.89	0.93	1	0.94	0.89	0.8	0.83	0.12	-0.05	0.023
lag_6	0.86	0.84	0.85	0.86	0.89	0.94	1	0.94	0.8	0.84	0.13	-0.11	0.023
lag_7	0.88	0.86	0.85	0.85	0.87	0.89	0.94	1	0.81	0.84	0.13	-0.11	0.023
quarter	0.76	0.77	0.78	0.78	0.79	0.8	0.8	0.81	1	0.97	0.015	0.0037	2.5e-15
month	0.79	0.8	0.81	0.82	0.82	0.83	0.84	0.84	0.97	1	0.013	-0.0072	2.6e-15
day	0.044	0.077	0.093	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.015	0.013	1	0.016	1.9e-16
week_day	-0.13	0.031	0.13	0.077	0.0044	-0.05	-0.11	-0.11	0.0037	-0.0072	0.016	1	1.8e-17
hour	0.025	0.024	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	2.5e-15	2.6e-15	1.9e-16	1.8e-17	1
	Load	lag_1	lag_2	lag_3	lag_4	lag_5	lag_6	lag_7	quarter	month	day	week_day	hour

Рис.2. Матрица корреляции признаков и целевой переменной

Помимо определения силы линейной связи был применен энтропийный подход, называемый Information Gain (IG), более подробно описанный в [3]. Этот подход позволяет получить список факторов, отсортированный относительно их силы влияния на целевую переменную.

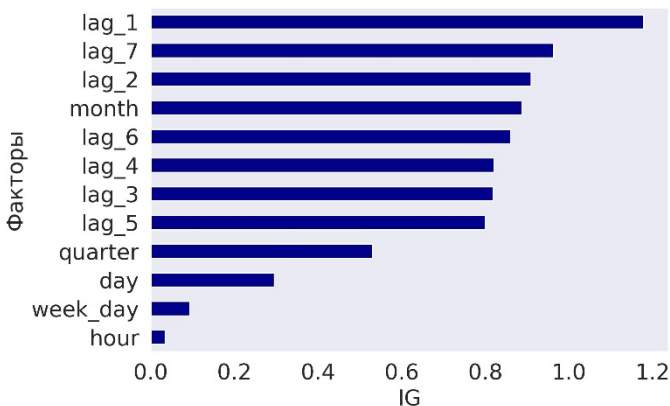


Рис.3. Влияние признаков на целевой результат

В результате анализа набора данных было принято решение оставить в модели все из рассмотренных факторов за исключением некоторых лагов целевой переменной (lag_2-lag_7). Набор данных был разделен на обучающий и тестовый в соотношении 80:20 и проведена Z-нормализация признаков. Для анализа сезонности было проведено STL-разложение ряда электропотребления. Параметр сезонности и период был выбран как 745 и 12 соответственно. Таким образом, с помощью STL-разложения была проведена декомпозиция ряда на аддитивные составляющие: тренд, сезонную, остаточную.

Для создания прогнозных моделей были использованы алгоритмы случайного леса (Random Forest), экстремального (XGBoost) и категориального градиентного бустинга (CatBoost), рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (Long short-term memory – LSTM). Также была создана модель линейной регрессии для того, чтобы сравнить классические и интеллектуальные методы прогнозирования электропотребления. Подбор параметров моделей происходил с помощью GridSearchCV. Структура модели нейронной сети LSTM была подобрана в результате выполнения серии экспериментов. Наилучшей оказалась следующая структура: 4 слоя LSTM по 32, 64, 25 нейронов соответственно, линейный слой и выходной. Для оптимизации был использован алгоритм Adam, обучение происходило с разбиением на партии, оптимальный размер которой составил 256. Сходимость результата была достигнута при выполнении 2000 итераций, в качестве функции активации была выбрана среднеквадратичная ошибка (mean squared error – MSE). Качество моделей оценивалось с помощью набора метрик: средней абсолютной ошибки (mean absolute error – MAE), средняя ошибка в процентах (mean absolute percent

eggor – MAPE), коэффициент детерминации (R^2), квадратный корень среднеквадратичной ошибки (RMSE) и MSE, вычисляемых по (1-4) соответственно.

$$MAE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (1)$$

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \cdot 100\% . \quad (2)$$

$$R^2(y, \hat{y}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} . \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

где y и \hat{y} – это фактическое и прогнозное электропотребления; n – количество наблюдений.

В таблице 1 представлены значения метрик прогнозных моделей. Близкие результаты прогнозирования были получены с помощью моделей XGBoost, CatBoost, LSTM, наилучшей была признана модель, основанная на алгоритме CatBoost по значениям всех метрик.

Табл. 1
Оценка качества прогнозных моделей

Модель	Метрики качества на тестовом наборе данных				
	MAPE, %	MAE	MSE	RMSE	R^2
Линейная регрессия	10.01	407.79	310464.39	557.19	0.89
Random Forest	5.18	231.05	112323.92	335.15	0.96
XGBoost	4.81	215.3	95806.67	309.53	0.97
CatBoost	4.01	180.02	69659.73	263.93	0.98
LSTM	4.78	218.53	93807.05	306.28	0.97
STL-CatBoost	3.98	175.49	62762.79	250.53	0.98

Поэтому для анализа сезонности прогнозирование аддитивных составляющих, полученных с помощью STL-разложения, было проведено с помощью модели CatBoost. Это позволило уменьшить погрешность прогноза и сформировать методику краткосрочного прогнозирования (Рис. 4).

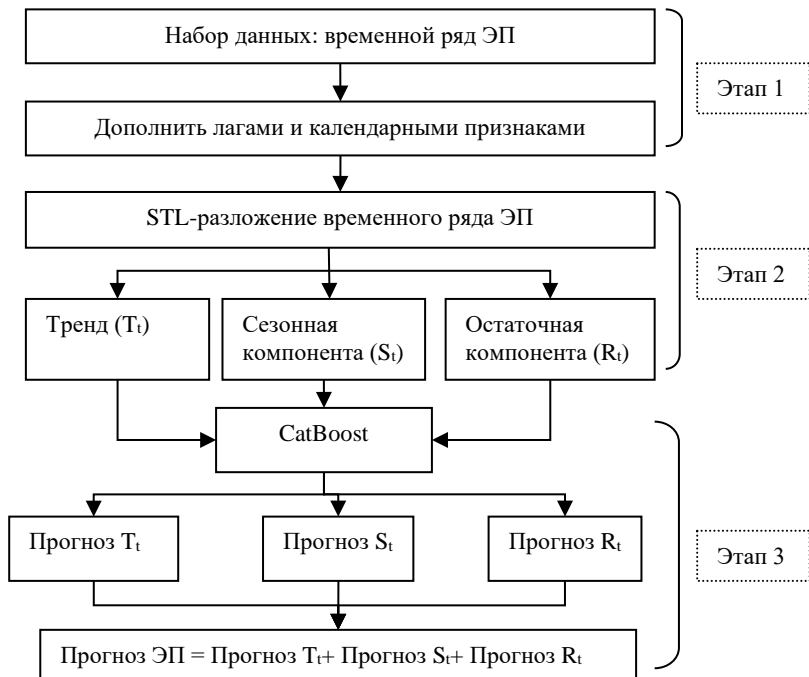


Рис. 4. Методика краткосрочного прогнозирования

Данная методика включает этапы предобработки данных, декомпозицию ряда на аддитивные составляющие, их прогнозирование и агрегирование прогнозов. Выполнение этой последовательности действий позволило на тестовом наборе данных получить прогноз с погрешностью менее 4%.

Заключение

В данном исследовании были получены результаты, позволяющие сформировать рекомендации по применению методов интеллектуального анализа данных для задачи краткосрочного прогнозирования электропотребления. Можно констатировать, что декомпозиция ряда на тренд, сезонность и остаток позволяет улучшить качество прогнозной модели. Методика краткосрочного прогнозирования, описанная в работе, позволяет учитывать сезонность в данных за счет применения STL-разложения. Перспективным направлением исследований является апробация предложенной методики на других наборах данных и при других интервалах упреждения прогноза.

Список литературы

- [1] Бэнн, Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: Перевод с английского. – Москва: Энергоавтомиздат, 1987. – 200 с.
- [2] R.V. Klyuev, I.D.Morgoev, A.D. Morgoeva, O.A. Gavrina, N.V.Martyushev, E.A. Efremkov, Q. Mengxu, Methods of Forecasting Electric Energy Consumption: A Literature Review // *Energies*, 2022, Vol. 15, no. 23: 8919. DOI: 10.3390/en15238919.
- [3] Моргоева, А.Д. Моргоев, И.Д. Клюев, Р.В. Кочковская, С.С. Прогнозирование почасовой выработки электроэнергии солнечной электростанцией с помощью алгоритмов машинного обучения // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2023. –Т. 334. –№ 12. –С. 7–19. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4253

METHODOLOGY FOR SHORT-TERM PREDICTION OF ELECTRICAL LOAD FOR AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

A.D. Morgoeva (*m.angelika-m@yandex.ru*)

North Caucasian Institute of mining and metallurgy(State
Technological University), Vladikavkaz

Scientific supervisor: Doctor of Technical Sciences, Professor

R.V. Klyuev (*kluev-roman@rambler.ru*)

North Caucasian Institute of mining and metallurgy(State
Technological University), Vladikavkaz

The paper presents the results of research on forecasting daily power consumption schedules of an industrial enterprise. A methodology for short-term forecasting of enterprise power consumption was developed, intended for implementation in an automated dispatch control system for power consumption. When developing the methodology, a series of empirical studies were carried out to create and optimize predictive models of power consumption; neural network architectures and classical machine learning algorithms, as well as the method of decomposing time series into additive components, were used as research methods.

Keywords: forecasting, artificial intelligence, machine learning, gradient boosting, artificial neural networks.

УДК 621.31

ЭФФЕКТЫ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВНЕДРЕНИЕМ АВТОКЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

А.В. Тарасов (*art_tarasov@internet.ru*)
Институт Ядерной Энергии и Промышленности,
СевГУ, Севастополь

В работе описываются основные эффекты при модернизации сети с внедрением автокластерной структуры. Статья представляет собой описание эффектов на примере внедренного реального проекта – Цифрового РЭС в Сакском районе Республики Крым.

Ключевые слова: автокластерная, структура, модернизация, эффекты, SAIDI, SAIFI, районные электрические сети, воздушные линии электропередачи, Республика Крым, Цифровой РЭС.

Введение

Современная распределительная сеть электроснабжения является ключевым элементом инфраструктуры, обеспечивающим передачу и распределение электроэнергии от производителей к конечным потребителям. Однако существующая структура этой сети имеет ряд значительных недостатков, которые затрудняют ее эффективную работу и адаптацию к современным вызовам энергетического рынка. Для решения этих проблем предлагается модернизация распределительной сети с внедрением автокластерной структуры, что позволяет значительно повысить эффективность, надежность и устойчивость электроснабжения. Получаемые эффекты от такой модернизации будут рассмотрены далее.

1. Описание структуры распределительной сети AS IS «как есть». Способы модернизации.

1.1 Особенности построения распределительной сети 6-35 кВ.

Рост численности населения, расширение инфраструктуры и запуск новых предприятий неминуемо приведут к повышению величины потребления электроэнергии. Что приводит к увеличению точек поставки электроэнергии и присоединений, при этом растут и требования к распределительным сетям.

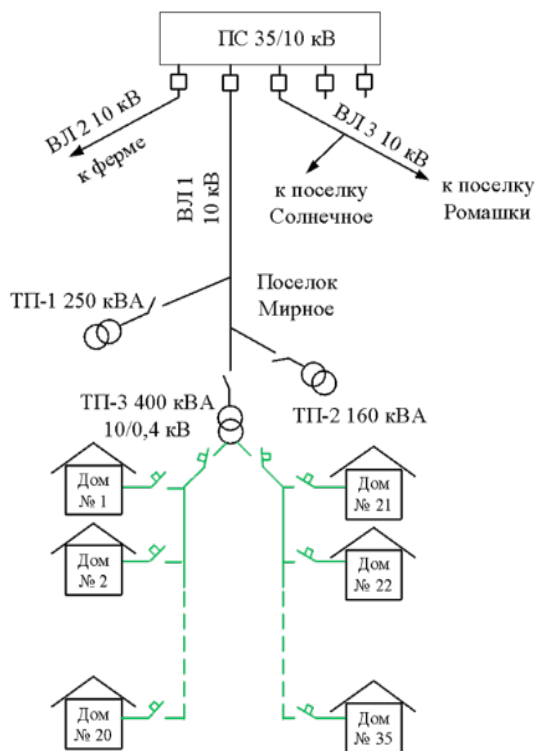


Рис. 1. Участок сети РЭС

Основными требованиями к распределительным сетям, как и раньше, остаются надежность, энергоэффективность, гибкость, безопасность. Однако в следствии некоторых особенностей, сложившихся исторически и из-за того, что в процессе развития распределительных сетей, на это уделялось мало внимания, подавляющее количество распределительных сетей им не соответствует.

Зачастую в настоящее время электрические сети энергоснабжения 6 – 35 кВ построены таким образом, что один их видов коротких замыканий на каком – либо участке может привести к отключению всей секции или системы шин, к которым одновременно подключены множество потребителей. Такая структура называется иерархическая. Пример такого района электрической сети приведен на Рисунке 1.

А специфика прокладки и устройства воздушных, кабельных линий электропередачи (ВЛ, КВЛ) на данных классах напряжений такова, что вероятность короткого замыкания на них достаточно высока. Такие линии

электропередачи имеют радиальное строение древовидной структуры. В связи с тем, что в прошлом наблюдался дефицит инвестиций в реконструкцию и развитие этих электрических сетей, в настоящее время имеется возможность запитать новых потребителей от существующих центров питания, что приводит к росту потребления, увеличению радиуса электроснабжения потребителей от центра питания [Хасанзянов, 2014]. К характеристикам сетей можно добавить и имеющиеся множества резервных связей, выполненных с помощью неавтоматизированных разъединителей.

Более того, такие сети являются последним этапом на пути электрической энергии к потребителю, а их протяжённость (в частности ВЛ 6 (10) кВ) составляют более 1,5 млн км [Воротницкий, 2005] – почти 45% всей протяжённости всех линий 0,4 – 110 кВ. А 70% всех нарушений работы случается именно на данных линиях. Длительность отключений потребителей составляет 70 – 100 часов в год, что значительно выше, чем в технически развитых западных странах [Бузин, 2007].

С учетом вышесказанного сформулируем особенности распределительных сетей РЭС :

- Характерен большой износ оборудования (более 70% оборудования распределительных сетей) [Федяков, 2010]. Темпы реновации основных фондов на сегодняшний день явно ниже темпов старения;
- Режим заземления нейтрали – изолированная нейтраль. Вследствие этого обеспечивающие малые токи замыкания на землю и возможность работы сети в течение некоторого времени с замкнувшейся на землю фазой [Шуин и др., 2001];
- Наблюдаемость сети – минимальная. В лучшем случае устройства телемеханики (ТМ) оснащены некоторые центры питания (ЦП) 35/6(10) кВ;
- Оснащение приборами учета – минимальное количество установленных на энергообъектах (ЦП). Приборы учета как, правило устаревшие (индукционные счетчики не имеющие возможности передавать данные в АИИСКУЭ), зачастую неработоспособные;
- Недостаточная достоверность показаний приборов учета и низкая наблюдаемость электрической сети приводят к ограниченному анализу электроэнергетического режима;
- Управление режимами – в основном ручное переключение и редко дистанционное управление (включить, отключить); Вследствие отсутствия ТМ и наличия большого количества коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей) оперативные переключения в большинстве случаев, сводятся к выполнению сложных последовательных операций по переключениям вручную;

- Загрузка сети – низкая, особенно в ночное время суток. Отдельные распределительные центры питания (КТП) 6–10/0,4 кВ могут иметь загрузку 30% и ниже;
- Схемы сети – избыточные. Так же в распределительных сетях присутствует большое количество избыточных участков сети, наличие которых обусловлено уже сложившейся схемой электроснабжения в связи с исторически сложившимися особенностями развития энергоснабжения территорий;
- Низкая надежность. Все вышеприведенные проблемы приводят к существенному снижению надежности энергоснабжения потребителей;
- Низкое качество электроэнергии. В ряде случаев у конечных потребителей электроэнергии напряжение может достигать ниже необходимых наименьших используемых 198 В (при необходимом качестве от величины номинального фазного напряжения – 220 В, +-10%, это 198-242 В).

Проблемы управленческого контура:

- Коммерческие (финансовые) потери. В ряде случаев суммарные потери на фидерах могут достигать 30-40%. Это очень большая цифра;
- Дебиторская задолженность сетевых компаний. В качестве примера можно привести юридическое лицо, которое имело договор с сетевой компанией, а затем по каким-то причинам обанкротилось. При этом договор не разрывается, потребление электроэнергии ЭЭ имеет место быть (помещения могут быть уже сданы другим юридическим лицам, с которыми нет опосредованных договоров), задолженность накапливается, а оплаты не происходит. Т.е. отсутствие контроля и прозрачности в вопросах энергопотребления приводит к наличию серьезных дебиторских задолженностей;
- Отсутствие достоверной информации о конечных потребителях. Участки линий электропередач (ВЛ), трансформаторных подстанций (ТП) и распределительных пунктов (РП) не нанесены на нормальные схемы электрических соединений энергорайонов, временные схемы электроснабжения несанкционированных потребителей, информации о которых не нанесены на такие схемы, могут привести к недостаточному учету и контролю потребления электроэнергии, а так же наблюдаемости у оперативно-диспетчерского (ОП), оперативно выездного персонала (ОВБ);
- Ведение первичной документации энергообъектов – выполняется самим оперативным персоналом энергорайонов, энергообъектов. При подключении нового оборудования, распределительных

пунктов, в том числе потребительских подстанций ТП – информация должна передаваться заинтересованным службам и отделениям энергетического предприятия распределительных сетей и т.д., которые, в свою очередь вносят изменения в первичную документацию служб и отделений, вручную вносят изменения в нормальные схемы электрических соединений энергообъектов и энергорайонов;

- Эффективность планирования ремонтов и производства технического обслуживания (ТО) – ограничена или затруднена при отсутствии необходимых документов. Допуски к выполнению ремонтных работ выполняются так же на основании имеющейся документации на рабочем месте ОП.

Проблемы РЭС накапливались годами. Отсутствие необходимого и достаточного финансирования, производства масштабных реконструкций энергообъектов РЭС, кризис кадров, устаревший подход к организации процесса работы объектов РЭС на всех стадиях – от проектирования до эксплуатации – привели к технологическому и экономическому застою в распределительных сетях. Показатели надежности распределительных сетей 6-10 кВ в России в разы ниже, чем в промышленно-развитых странах [НТИ «EnergyNet», 2019].

1.2 Существующие подходы к модернизации распределительной сети 6-35 кВ.

В настоящее время определяют несколько методов к модернизации распределительной электрической сети. К ним можно отнести один из методов – поэтапную замену старого оборудования на более современное эффективное и надежное, этот метод применяется наиболее часто уже по отношению к существующей распределительной электрической сети. Применим и альтернативный метод – подход, который реализован в Национальной инициативе «Цифровой РЭС» [НТИ «EnergyNet», 2019].

Ключевой технологией проекта «Цифровой РЭС» является создание активно-адаптивной сети.

Она включает в себя:

- усовершенствование топологии сети;
- модернизацию центров питания;
- автоматизацию отключения минимально возможного поврежденного участка сети.

Рассмотрим каждое проектное решение в отдельности:

1.2.1 Традиционный подход к модернизации. Под этим методом подразумевается решение проблемы «в лоб». При возникновении проблем на каком-либо участке сети, в оборудовании, и. т. п, зачастую способом

решения этой самой проблемы становится замена оборудования. Такой подход «здесь и сейчас» не учитывает, что будет дальше на этом участке сети, также не учитывает, что будет на смежных участках сети. При необходимости увеличения мощности, не проводится анализ причин, а устанавливается более мощный трансформатор в центре питания, в следствии чего средства потрачены – нерационально.

1.2.2 Модернизация распределительной сети электроснабжения с внедрением автокластерной структуры. При модернизации сети с внедрением автокластерной структуры используется комплексный подход. Суть модернизации состоит в создании автокластерной сети которая предполагает деление сети на кластеры электрически связанных фидеров, состоящие из секций, преимущественно имеющих резервирование, причем упомянутые секции состоят из линий, как правило, также имеющих резервирование, пример такой модернизации показан на Рисунке 1.2. Это повышает надежность сети по сравнению с традиционной топологией.

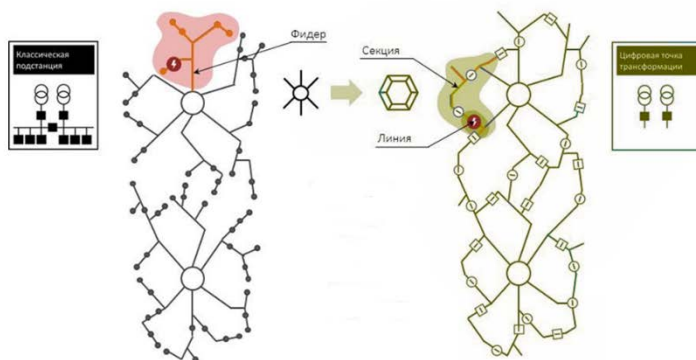


Рис. 1.2. Участок сети РЭС

Для создания автокластерной сети используются следующие инструменты:

- корректировка топологии электрической сети;
- установка автоматических коммутационных аппаратов на ВЛ 10 (6) кВ (реклоузеры или вакуумные выключатели в ЗТП);
- установка неавтоматических коммутационных аппаратов на ВЛ 10 (6) кВ (сборки однофазных разъединителей);
- замена или модернизация распределительных устройств 10(6) кВ на ПС 110(35)/10(6) с установкой вакуумных выключателей и РЗА, одерживающей идеологию автокластерной сети;

- строительство точек трансформации 35/10(6) кВ;
- развертывание программного обеспечения GeoSCADA, GeoProject.

Оптимизация топологии электросетей включает в себя следующие ключевые мероприятия:

- Удаление ненагруженных параллельных линий: Это включает исключение из сетевой топологии линий, которые характеризуются низкой загрузкой и высокой пропускной способностью, что приводит к неэффективному использованию ресурсов и увеличению операционных затрат;
- Устранение устаревших участков: Включает удаление из сети участков, которые больше не питают нагрузку, например, отпайки к несуществующим трансформаторным подстанциям, что повышает общую надежность сети и снижает затраты;
- Исключение избыточного резервирования: Рекомендуется устранение линий с двукратным или трехкратным резервированием, которые могут снижать общую надежность сети и увеличивать затраты;
- Удаление линий с неоптимальной топологией: Предлагается исключение и перестройка линий, подключенных неоптимальным образом, что приводит к увеличению протяженности сети и повышению затрат;
- Строительство новых участков линий: Для обеспечения сетевого резервирования и улучшения надежности сети рекомендуется строительство новых участков линий и вспомогательных соединений;
- Исключение распределительных пунктов (РП): Предлагается замена РП автоматическими или неавтоматическими коммутационными аппаратами, используя решения по исключению и строительству участков линий;
- Строительство новых центров питания: В случаях, когда невозможно организовать сетевое резервирование, рекомендуется строительство новых центров питания для повышения надежности сети.

Как и было сказано ранее, для успешной модернизации распределительной сети, и её переходу на автокластерную структуру, необходимо установка коммутационных аппаратов. При помощи реклоузеров, вакуумных выключателей в ЗТП и сборок однофазных разъединителей будет осуществляться резервирование линий распределительной сети. Реклоузер предназначен для автоматического отключения повреждения и переконфигурации сети. Для этого он оснащен МПЗ. Большой коммутационный ресурс вакуумного выключателя позволяет использовать АПВ многократного действия. Наиболее

современные реклоузеры (реклоузеры 10 кВ) снабжаются безуставочной РЗА. Это значит, что уставки РЗА реклоузера не требуют перенастройки, и реклоузер будет работать правильно в любом режиме работы сети (например, при изменении тока нагрузки) и не будет зависеть от него.

В качестве не автоматических коммутационных аппаратов применяются различные типы разъединителей, для увеличения надежности рекомендуется применять сборки однофазных разъединителей.

SMART-ретрофит существующего электротехнического оборудования, или модернизация распределительных устройств 10(6) кВ, представляет собой комплексную модернизацию, включающую обновление компонентов распределительных устройств КРУ/КСО 10(6) кВ. Это достигается за счет замены устаревших выключателей, трансформаторов тока и систем защиты на интегрированные решения, такие как ВВ/TEL, КДТН и МПЗ.

Точка трансформации 35/10 кВ, представляющая собой одно–трансформаторную подстанцию, основной функцией которой является трансформация напряжения без распределения электроэнергии. Это техническое решение, в сочетании с оптимизацией топологии смежной сети, обеспечивает экономическую эффективность развития сетевой инфраструктуры.

Проектирование следует выполнять в программном комплексе Geoproject. Так же необходимо развертывание программного обеспечения GeoSCADA. GP (GeoProject) позволяет:

- Разбить сеть на кластеры и выполнить оптимизацию топологии;
- Расставить автоматические и неавтоматические коммутационные аппараты, а также рассчитать эффекты от их применения;
- Рассчитать режимы работы сети;
- Представить результаты моделирования в удобной форме (например, возможна выгрузка параметров из модели);
- Разработать и оценить решения для повышения качества и надежности энергоснабжения потребителей.

2. Эффекты при модернизации распределительной сети электроснабжения с внедрением автокластерной структуры

Как и говорилось ранее, для модернизации сети с внедрением автокластерной структуры используют определенные инструменты, каждый из них привносит свой вклад и влияет на конечный результат. Рассмотрим подробнее эффекты от каждого инструмента:

Табл.1.

Инструмент	Эффекты
Корректировка топологии	Устраняются избыточные и неоптимальные участки сети; Устраняются низкая загрузка сети и неоптимальные режимы работы; повышается качество и надежность энергоснабжения потребителей.
Установка автоматических КА	Замена СП и масляных выключателей на реклоузеры уменьшает степень износа основных фондов; Увеличивается наблюдаемость сети; Увеличивается оснащение приборами учёта; Увеличивается достоверность знания режима; Увеличивается степень автоматизации управления режимами; Устраняется необходимость пересчета уставок РЗА распределительной сети; Повышается надежность электроснабжения.
Установка не автоматических КА	Повышение надежности; Уменьшение степени износа основных фондов.
Ретрофит оборудования	Продление срока службы; Экономия на модернизации.
Строительство ТТ	Уменьшается степень износа основных фондов; Повышается наблюдаемость сети; Увеличивается оснащение приборами учёта; Увеличивается достоверность знания режима; Увеличивается степень автоматизации управления режимами; Повышается надёжность энергоснабжения.
Развертывание ПО	Устраняются низкая загрузка сети и неоптимальные режимы работы; повышается качество и надежность энергоснабжения потребителей; Повышается наблюдаемость сети; Повышается достоверность знания режима; Увеличивается степень автоматизации управления режимами. Увеличивается надежность энергоснабжения.

Благодаря этим эффектам в РЭС будет наблюдаться повышение надежности электроснабжения, автоматизации и наблюдаемости сети. Технологии облегчают работу персонала и уменьшают время ее выполнения, минимизируют вероятность ошибки. Оборудование ЦРЭС является малогабаритным.

3. Эффекты после модернизации части Сакского РЭС.

При проведении модернизации части участка Сакского РЭС с внедрением автокластерной структуры, были выполнены работы, результаты которых приведены в таблице 2:

Табл.2.

Характеристики центров питания	
Сеть до модернизации	Сеть после модернизации
Количество – 4 шт. Типы выключателей отходящих линий – масляные. АПВ однократное или отсутствует (ПС Утренняя Заря).	Количество – 5 шт.; Типы выключателей отходящих линий – вакуумные; АПВ двукратное.
Характеристики секционирующих аппаратов	
Сеть до модернизации	Сеть после модернизации
Количество – 24 шт. Тип – обслуживаемые разъединители.	Количество – 15 неавтоматических и 19 автоматических; Тип – необслуживаемые вакуумные реклоузеры (автоматические) и необслуживаемые элегазовые выключатели нагрузки (неавтоматические).
Характеристики ТП	
Сеть до модернизации	Сеть после модернизации
Количество – 164 шт. Количество потребителей - 7602 шт. Аппараты в РУ 10 кВ – разъединители или выключатели нагрузки.	Количество – 164 шт.; Количество потребителей – 7602 шт. Аппараты в РУ 10 кВ – разъединители или выключатели нагрузки.

Для оценки параметров сети, воспользуемся основными параметрами, которые в наибольшей степени характеризуют её. Основным документом, регламентирующим порядок расчета показателей надежности

электроснабжения, является приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29 ноября 2016 г. № 1256. Целевые значения показателей надежности электроснабжения устанавливаются регулирующим органом (комитетом по тарифам) согласно Приказу.

Таковыми параметрами являются:

– Индекс средней продолжительности отключений по системе (SAIDI), ч/год;

– Индекс средней частоты отключений по системе (SAIFI), откл/год.

Так же для оценки параметров сети воспользуемся следующими показателями:

Недоотпуск электроэнергии, кВт·ч/год;

Нагрузочные потери, кВт;

Максимальное отклонение напряжения, %.

Исходя из [Рукавишников, 2020] составим сводную таблицу показателей качества до модернизации сети и после:

Табл.3.

Показатель	Было	Стало
Длина сети, км	142,8	136,5
Индекс средней продолжительности отключений по системе (SAIDI), ч/год	14,1	1,7
Индекс средней частоты отключений по системе (SAIFI), откл/год.	3,3	0,9
Недоотпуск электроэнергии, кВт·ч/год	85 796	12 481
Нагрузочные потери, кВт	71,1	39,8
Максимальное отклонение напряжения, %	10,9	9,9

Заключение

Анализ показателей надежности сети позволяет увидеть, что долгосрочные проблемы, оставленные без должного внимания, привели к недостаточному уровню функционирования многих распределительных сетей в частности 6-10 кВ. Простые технологические и технические вмешательства и внедрения в процессе модернизации части электрических сетей, такие как замена оборудования, часто оказываются недостаточными или слишком затратными. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода к улучшению состояния электрических сетей, который учитывает не только текущие проблемы, но и предусматривает стратегическое планирование ресурсов с целью

обеспечения долгосрочной надежности и эффективности системы на перспективу.

Список литературы

- [1] Хасанзянов Б.Ф. О реклоузерах // Молодой учёный, №7, 2014.
- [2] Воротницкий В. Реклоузер – новый уровень автоматизации и управления ВЛ 6(10) кВ / В. Воротницкий, С. Бузин // Новости электротехники, №3, 2005.
- [3] Бузин С.А., Воротницкий В.В. Современная релейная защита и автоматика для целей автоматизации воздушных распределительных сетей 6-10 кВ 2007, URL: <http://masters.donntu.org/2007/eltf/strelnikova/library/3.pdf>. / (дата обращения 15.03.2024)
- [4] Федяков И.В. Износ оборудования системная проблема всей электроэнергетической отрасли 2010, URL: <http://www.rcit.su/article022.html> (дата обращения 17.03.2024)
- [5] Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ.// Библиотечка электротехника.2001.№11
- [6] НТИ «EnergyNet» 2019, URL: <https://energiavita.ru/wp-content/uploads/2019/10/Meshik.pdf> (дата обращения 14.03.2024)
- [7] Рукавишников Е.А. Реализация пилотного проекта «Цифровой РЭС – Крымэнерго», URL: <https://ppt-online.org/912086> (дата обращения 17.03.2024)

The effects of modernizing the power distribution network with the implementation of a microgrid structure

A.V. Tarasov (*art_tarasov@internet.ru*) Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University (SevSU), Sevastopol.

The paper describes the main effects of modernizing the network with the implementation of an auto-cluster structure. The article provides a description of the effects using the example of a real project - the Digital Power Distribution System in the Saksy district of the Republic of Crimea.

Keywords: auto-cluster, structure, modernization, effects, SAIDI, SAIFI, district electrical networks, overhead power lines, Republic of Crimea, Digital Power Distribution System.

УДК: 621.31

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИТИЕВЫХ И ПРОТОЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

И.С. Заславский (*zaslavskiyis@kuzstu.ru*)
Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина

Ф.С. Непша (*nepshafs@gmail.com*)
ООО «РТСофт-СГ», Москва

Широкое внедрение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) объясняется постоянным снижением их удельной стоимости и увеличением доли генерации на ВИЭ. На мировом рынке представлен широкий спектр технологий СНЭЭ, в связи с этим актуальна задача выбора рациональных решений для накопления электрической энергии. В данной статье рассматриваются технические особенности литийионных и проточных СНЭЭ, приведены результаты их технико-экономического сравнения. В заключении отмечены перспективы дальнейшего применения проточных СНЭЭ в автономных энергосистемах и в электротехнических комплексах (ЭТК) работающих параллельно с сетью.

Ключевые слова: литийионные батарея, проточная батарея, накопитель энергии, возобновляемая энергетика

1. Введение и постановка проблемы

Энергосистемы мира проходят процесс декарбонизации транспорта, активного внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), увеличения энергоэффективности распределительной сети, повышения энергоэффективности и надежности автономных энергосистем путем замены дизельных генераторов на гибридные энергоустановки (АГЭУ) на основе ВИЭ, обеспечения высокого уровня надежности электроснабжение потребителя. Внедрение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) будет играть решающую роль в период интенсивного развития

энергетики. В статье [Kebede [и др.], 2022] проведен анализ параметров накопителей энергии с учетом экономических, технических и экологических аспектов, рассмотрены гибридные решения для интеграции с возобновляемой генерацией. В обзоре [Nazaralizadeh [и др.], 2024] рассматриваются системы управления накопителем с различными формами энергии. В работах [Зырянов [и др.], 2020] указывается различный опыт применения технологий подсистем накопления в энергосистемах. Одной из особенностей накопителя [Куликов ЮА] подчеркивается синергетический эффект механизмов его применения, т.е. способность использования накопителя для одновременного выполнения нескольких функций.

Согласно [Распоряжение правительства, 2023] Российская Федерация стремится к технологическому лидерству в области систем накопления энергии, что открывает перспективы для развития производства и использования передовых технологий. Лидирующие на рынке подсистемы накопления – литийионные батареи на базе оксидов никеля-кобальта-алюминия и никеля-марганца-кобальта. По данным отчета [Bielewski [и др.], 2023] европейской комиссии, в будущем литийионные батареи останутся доминирующими, но ожидается переход к электрохимическим системам. Проточные батареи с ванадиевым электролитом считаются перспективными в этой области.

Проточный накопитель функционирует на основе электрохимической реакции в разрядно-зарядном блоке (далее СТЕК), где электролит циркулирует через электроды, преобразуя химическую энергию в электрическую. Структурно накопитель состоит из СТЕК, емкостей для хранения электролита, циркуляционных насосов, кислотопроводов и инверторов. Ячейки СТЕК содержат ионообменные мембраны, электроды и биполярные пластины, через которые происходит перемещение и преобразование электролита. При эксплуатации [Trovò [и др.], 2021] происходит уменьшение емкости электролита из-за перехода ионов отрицательно заряженного состояния в положительно заряженное через ионообменную мембрану. Этот процесс обратим и может быть восстановлен путем смешивания разноименных электролитов, что называется ребалансировкой и может занимать до 20 минут. Срок службы ванадиевых проточных батарей (ВПБ) зависит от деградации электролита, ионнообменной мембраны, электродов и биполярных пластин [Yuan [и др.], 2019]. Осаждение частиц ванадия на электродах, примеси в электролите, колебания температуры и давления снижают производительность и стабильность работы ВПБ. Деградация мембран происходит из-за химических реакций во время циклов зарядки-разрядки, механических напряжений и движения молекул воды. Коррозия электродов приводит к износу материала, накоплению частиц и побочным реакциям, что может снизить емкость и производительность батареи. Деградация биполярных

пластин вызвана коррозией, выделением газов и механическими воздействиями, снижая производительность и долговечность ВПБ. Скорость отклика [Aluko, Knight, 2023] проточных батарей составляет более 20 мс. Отключение насосов может предотвратить саморазрядку, [Bindner [и др.]] но занимает около 7 минут. Недостатками ВПБ являются [Ali [и др.], 2023] низкая плотность энергии, ограниченная плотность мощности, сложная конструкция, низкий КПД, температурная чувствительность, высокие эксплуатационные расходы и ограниченный срок службы.

Литийонные батареи – распространенная технология химического хранения энергии, включающая анод, катод, токосъемники, сепаратор и электролит. Они состоят из анода, катода, токосъемников, сепаратора и электролита. В процессе эксплуатации могут возникать различные механизмы деградации [S. Edge [и др.], 2021], такие как осаждение лития на аноде, образование слоя на границе катода-электролита, коррозия токосъемников, уменьшение объема электролита, высокие температуры, влажность, снижение скорости реакции электронов. Обладают высоким КПД, плотностью энергии и мощности, быстрым откликом, простым алгоритмом заряда и низким периодом разряда. Однако у них есть недостатки: ограниченный срок службы, разрушение при высоких температурах, проблемы с быстрой зарядкой при низких температурах, взрывоопасность, содержание вредных материалов, низкая глубина разряда, коррозия, саморазряд и потеря эффективности.

Каждая из указанных технологий подсистемы накопления требует применения специализированных мер безопасности, соответствующих их уникальным характеристикам. Характеристики [Bai, Song, 2023; Kebede [и др.], 2022; Khalid, Stevenson, Sarwat, 2021; Palizban, Kauhaniemi, 2016; Silva Lima da [и др.], 2021; Tomaszewska [и др.], 2019; Aramendia [и др.], 2021] литийонных и проточных аккумуляторов энергии представлены в таблице 1.

Табл. 1.

Технология подсистемы накопления	Нормированная максимальная мощность, МВт	КПД, %	Время отклика	C-rate	Срок службы, годы (циклы)	Время заряда	Продолжительность работы	Плотность энергии (Вт·ч/кг)	Плотность мощности (Вт/кг)	Общие затраты
Литийионный накопитель	≤100	65–95	20мс–с	0,5С–3С	5–15 (500–10,000)	≤1ч	2–4 ч	75–200	150–370	200 \$/кВт·ч 18 тыс. р/ кВт·ч
Проточный накопитель	≤100	60–80	≥ 20 мс; время старта насосной системы (7 мин)	0,125 С–5С	20 (20,000)	≤8ч	3–10 ч	10–25	80–150	224(8ч) \$/ кВт·ч 20(8ч) тыс. р/кВт·ч

2. Возможный спектр применение накопителей энергии в энергосистеме и изолированно

Регулирование частоты и активной мощности. Одним из основных режимных параметров работы энергосистем является частота электрического тока. Нарушение баланса активной мощности приводит к изменению частоты в системе. Существуют [Tang, Lim, 2016] три механизма регулирования частоты: первичное, вторичное и третичное. Первичное регулирование моментально мобилизует первичные резервы генерирующей мощности. Требуемое время реагирования первичного генерирующего резерва составляет 5–30 с. Вторичное регулирование корректирует уровни генерации для восстановления баланса после первичной реакции. Этот уровень регулирования реагирует на первичные резервы регулирования в течение 5–15 минут. Дополнительное регулирование планирует энергоснабжение и оптимизирует выработку для стабильности системы. Этот уровень резервирования устанавливается вручную и должен быть достигнут через 15–60 минут, в зависимости от страны. СНЭЭ способны быстро реагировать на сигнал регулирования отклонения частоты.

Повышение устойчивости по напряжению. Величина напряжения в сети зависит от нагрузки в данный момент. Провалы и просадки напряжения могут возникнуть вследствие аварийных нарушений или подключений больших нагрузок потребителем. Изменение напряжения осуществляется регулированием реактивной мощности. СНЭЭ может поддерживать требуемый уровень напряжения обменом активной и реактивной мощностью с сетью. Время реагирования накопителя от 0,1 секунды. Повышение эффективности возобновляемых источников энергии. Стохастичный характер погодных явлений затрудняет управление возобновляемой генерацией. СНЭЭ необходимо иметь достаточное время отклика и запас энергии для работы в диапазоне от нескольких минут до нескольких часов для реагирования на резкопеременный характер генерации ВИЭ.

Построение автономных гибридных энергоустановок. Управление энергопотреблением АГЭУ сталкивается с возможными авариями, незначительными сбоями и стохастическим характером генерации. Дизельные генераторы часто используются для обеспечения надежности в автономных энергосистемах. Применение СНЭЭ с высокой скоростью отклика может улучшить экономические показатели за счет уменьшения расходов на топливо, замену резервных дизельных генераторов и увеличение срока службы генераторной системы путем сокращения времени ее работы в течение года.

Оптимизация установленной мощности генераторных агрегатов и снижение расхода топлива. Включение СНЭЭ в автономную электростанцию позволяет снизить установленную мощность генераторов,

обеспечивая высокий коэффициент загрузки и значительное сокращение расхода топлива при сохранении максимальной мощности и объема производства электроэнергии. Также уменьшаются затраты на обслуживание и ремонт генераторных установок.

Устранение перегрузки сетевого оборудования и замещение сетевого строительства. Модернизация и строительство распределительных электрических сетей требуют крупных инвестиций. Сетевые компании часто сталкиваются с ограничениями из-за финансовых проблем, особенно в центрах крупных городов и на удаленных объектах. Применение СНЭЭ [ИЛЮШИН, 2022] позволит отложить реконструкцию сетей, избавиться от перегрузок трансформаторов, снизить нагрузку на оборудование и увеличить его срок службы.

Обеспечение качества электрической энергии. Внедрение высокотехнологичных электроприемников, их интеграция в автономных энергосистемах с ВИЭ генерацией, рост индивидуального бытового потребления приводит к повышенным требованиям к надежности и качеству электрической энергии. Накопитель с высокой скоростью отклика может использоваться для поддержания качества электрической энергии в допустимых пределах.

Выравнивание суточных графиков нагрузки. Изменение суточного электропотребления влияет на электрическую сеть, уменьшая располагаемую мощность и снижая перетоки по линиям в периоды максимумов нагрузки и потребность в дополнительной генерации. СНЭЭ позволяет потребителям сократить потребление, не влияя на производительность. В периоды низкой нагрузки СНЭЭ накапливает избыточную энергию, минимизируя необходимость отключения оборудования. Во время пиковых нагрузок СНЭЭ обеспечивает дополнительную мощность в сеть, уменьшая потребность в дополнительной генерации.

Защита генераторных агрегатов от резких изменений нагрузки. В АГЭУ дизельный агрегат сталкивается со скачкообразным изменением нагрузки значительной амплитуды, загрузкой меньше номинальной мощности из-за эксплуатационных требований. Применение накопителя параллельно с генератором позволяет обеспечить работу генератора в номинальном режиме и предотвратить его аварийное отключение.

Восстановление работы электростанции после её «посадки на ноль» без использования внешней сети. Восстановление электроснабжения после полного отключения требует запуска генераторов и подачи напряжения на линии электропередач. Для этого используются мощные генераторы, что требует дополнительных капитальных затрат. Быстрое восстановление электроснабжения является ключевой задачей. Работа СНЭЭ обеспечивает резервное питание, стабилизирует сеть и поддерживает восстановление производства электроэнергии. Накопитель обеспечивает надежное электроснабжение в ситуациях, когда основные источники питания

недоступны, а комбинация [Zhao [и др.], 2022] различных технологий подсистемы накопления позволяет использовать их преимущества для восстановления электроснабжения после «посадки на ноль».

Повышение надежности электроснабжения потребителей. Аварии, связанные с нарушением устойчивости могут быть подавлены эффективным использованием СНЭЭ для демпфирования колебаний и предотвращения потери устойчивости. СНЭЭ также могут быть применены для дополнения автоматической частотной разгрузки и устранения самовозбуждения генераторов. Увеличение устойчивости энергосистемы по напряжению также возможно с использованием СНЭЭ.

Минимизация платы за электрическую энергию. Установка СНЭЭ позволяет потребителю экономически адаптировать свой график потребления энергии для сокращения расходов при изменении тарифов на электроэнергию. Различные модели ценообразования в мире предоставляют разнообразные возможности для снижения общей стоимости электроэнергии.

Оказание системных услуг. Управление спросом (DR) – услуга, позволяющая снизить энергопотребление конечным потребителем в ответ на экономические сигналы рынка электроэнергии и получить выручку за сокращение потребления. СНЭЭ, установленная у потребителя, позволяет ему участвовать в DR без необходимости отключения или изменения режима работы технического оборудования.

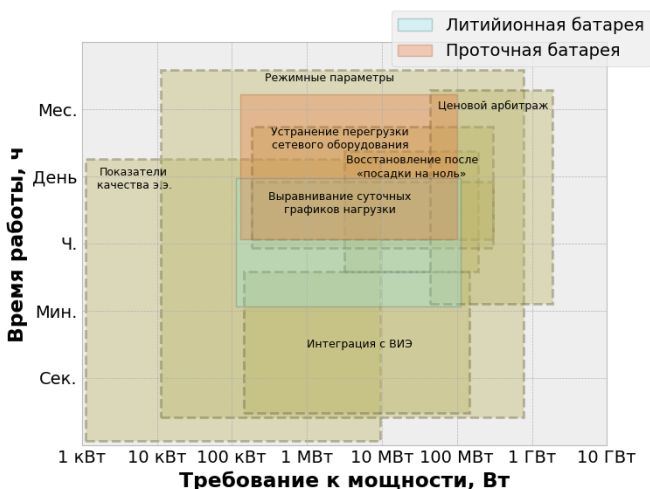


Рис. 1. Сравнение подсистемы накопления и спектров применений

3. Обсуждение результатов

На основе [Razzhivin [и др.], 2023] схематизированного спектра областей применения литийионных и проточных батарей на Рис. 1.

показаны основные задачи накопителей и исследуемые технологии подсистемы накопления. Проточные батареи подходят для ценового арбитража и снижения пиковой нагрузки из-за долгой разрядки. А литийионные батареи чаще могут использоваться для интеграции с ВИЭ и регулирования режимных параметров сети.

Заключение

Статья рассматривает технические особенности литийионных и проточных систем накопления энергии, а также приводит результаты сравнения их технических характеристик. В заключении освещаются перспективы использования этих систем в энергетике.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Список литературы

- [1] A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, M. Berceibar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – Т. 159. – С. 112213.
- [2] Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics / S. Nazaralizadeh, P. Banerjee, A. K. Srivastava, P. Famouri // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – *Battery Energy Storage Systems*. – № 5. – P. 1250.
- [3] Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт - Энергетическая политика. Системы накопления энергии / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, И. Ю. Коротков, [и др.]. – 2020. – URL: <https://energypolicy.ru/sistemy-nakopleniya-energii-rossijsk/energetika/2020/16/18/> (дата обращения: 14.04.2024). – Текст : электронный.
- [4] Накопители энергии — эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем. Куликов Ю.А. Электронный ресурс: https://fondsmena.ru/media/EGM_publicationfiles_Article/Куликов_ЮА.pdf.
- [5] Распоряжение Правительство РФ 356-р 28.02.2022 О принятии предложения Минэнерго России о подписании Соглашения о намерениях между Правительством РФ и Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" в целях развития в РФ высокотехнологической области "Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные"
- [6] Clean Energy Technology Observatory: Battery Technology in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets. – URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135406> (дата обращения: 14.04.2024). – Текст : электронный.
- [7] Fast Response of kW-Class Vanadium Redox Flow Batteries / A. Trovò, V. Di Noto, J. Eroua Mengou [и др.] // *IEEEE Transactions on Sustainable Energy*. – 2021. – Т. 12. – № 4. – С. 2413-2422.
- [8] A review of all-vanadium redox flow battery durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies / X.-Z. Yuan, C. Song, A. Platt [et al.] // *International*

- Journal of Energy Research. – 2019. – Vol. 43. – A review of all-vanadium redox flow battery durability. – № 13. – P. 6599-6638.
- [9] Aluko A. A Review on Vanadium Redox Flow Battery Storage Systems for Large-Scale Power Systems Application / A. Aluko, A. Knight // IEEE Access. – 2023. – Т. PP. – С. 1-1.
- [10] Characterization of Vanadium Flow Battery, revised / H. Bindner, C. Ekman, O. Gehrke, F. Isleifsson.
- [11] Applications of Energy Storage Systems in Enhancing Energy Management and Access in Microgrids: A Review / Z. M. Ali, M. Calasan, S. H. E. A. Aleem [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16. – Applications of Energy Storage Systems in Enhancing Energy Management and Access in Microgrids. – № 16. – P. 5930.
- [12] Lithium ion battery degradation: what you need to know / J. S. Edge, S. O’Kane, R. Prosser [et al.] // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2021. – Vol. 23. – Lithium ion battery degradation. – № 14. – P. 8200-8221.
- [13] Bai H. Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems / H. Bai, Z. Song // Journal of Power Sources. – 2023. – Т. 580. – Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery. – С. 233426.
- [14] Khalid A. Overview of Technical Specifications for Grid-Connected Microgrid Battery Energy Storage Systems / A. Khalid, A. Stevenson, A. Sarwat // IEEE Access. – 2021. – Т. PP. – С. 1-1.
- [15] Palizban O. Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications / O. Palizban, K. Kauhaniemi // Journal of Energy Storage. – 2016. – Т. 6. – С. 248-259.
- [16] Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems / L. da Silva Lima, M. Quartier, A. Buchmayr [и др.] // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2021. – Т. 46. – С. 101286.
- [17] Lithium-ion battery fast charging: A review / A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng [и др.] // eTransportation. – 2019. – Т. 1. – Lithium-ion battery fast charging. – С. 100011.
- [18] Tang Z. X. Frequency regulation mechanism of energy storage system for the power grid / Z. X. Tang, Y. S. Lim. – Текст : электронный // 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016) 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016). – 2016. – С. 1-8. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8278576> (дата обращения: 25.04.2024).
- [19] Vanadium Redox Flow Batteries: A Review Oriented to Fluid-Dynamic Optimization / I. Aramendia, U. Fernandez-Gamiz, A. Martinez-San-Vicente [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14. – Vanadium Redox Flow Batteries. – № 1. – P. 176.
- [20] Илюшин П. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии | Статьи журнала «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение» / П. В. ИЛЮШИН. – 2022. – URL: <https://eepir.ru/article/povyshenie-nadezhnosti-funkcionirovaniya-raspredeletelnyh-elektricheskikh-setej-za-schet-effektivnogo-primeneniya-sistem-nakopleniya-elektroenergii/> (дата обращения: 27.04.2024). – Текст : электронный.

- [21] Energy storage for black start services: A review / Y. Zhao, T. Zhang, L. Sun [и др.] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2022. – Т. 29. – Energy storage for black start services. – С. 691-704.
- [22] The energy storage mathematical models for simulation and comprehensive analysis of power system dynamics: A review. Part II / I. A. Razzhivin, A. A. Suvorov, R. A. Ufa [и др.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Т. 48. – The energy storage mathematical models for simulation and comprehensive analysis of power system dynamics. – № 15. – С. 6034-6055.

ANALYSIS OF THE USE OF LITHIUM AND VANADIUM ENERGY STORAGE SYSTEMS IN THE POWER SYSTEM

I.S. Zaslavskii (*zaslavskiyis@kuzstu.ru*)
Kuzbass State Technical University named after T. F.
Gorbachev, Kemerovo
Ural State University named after the first President of
Russia B. N. Yeltsin

F.S. Nepsha (*nepshafs@kuzstu.ru*)
ООО «RTSOFT-SG», Moscow

The widespread implementation of energy storage systems (ESS) is explained by the constant decrease in their specific cost and the increase in the share of generation from RES. A wide range of ESS technologies is presented on the global market, making the task of choosing rational solutions for energy storage relevant. This article examines the technical features of lithium-ion and flow ESS, provides the results of their techno-economic comparison. The conclusion highlights the prospects for further application of flow ESS in autonomous power systems and in electrical complexes (EC) operating in parallel with the grid.

Keywords: lithium-ion battery, flow battery, energy storage, renewable energy

УДК: 621.039

О РОЛИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

А.М.Широнина (shironina-03@mail.ru)

И.П.Воронин (ilya_10_voronin@mail.ru)

О.Л.Ташлыков (otashlykov@list.ru)

Уральский Федеральный Университет им. первого
Президента России Б.Н.Ельцина, Екатеринбург

Энергетика на органическом топливе является одним из основных источников выбросов углекислого газа. Большинство промышленных компаний мира не достигло поставленной перед собой цели – достижения нулевого выброса. Атомная энергетика признана одним из наиболее низкоуглеродных источников энергии и является единственной технологией, демонстрирующей способность резко сократить выбросы углекислого газа. К АЭС предъявляют дополнительные требования по безопасности и минимизации воздействия на окружающую среду, что актуализирует замыкание ядерного топливного цикла.

Ключевые слова: декарбонизация, парниковые газы, безуглеродная энергетика, АЭС, замкнутый ядерный топливный цикл

Введение

Глобальная декарбонизация, направленная на переход к низкоуглеродному развитию, является неотъемлемой частью борьбы с изменением климата, вызванным выбросами парниковых газов. Энергетика оказывает значительное влияние на углеродный след человечества [Ташлыков и др., 2015]. Преобладающее использование ископаемых топлив, таких как уголь, нефть и природный газ, приводит к высоким выбросам углерода при их сжигании [Tashlykov et al., 2014]. Это способствует увеличению содержания парниковых газов в атмосфере, что в свою очередь усиливает глобальное потепление. Переход к низкоуглеродной энергетике окажет глубокое влияние на различные отрасли экономики страны [Ташлыков и др., 2020]. Выбросы парниковых газов по секторам экономики в среднем по миру в год показаны на рисунке 1.



Рис.1. Выбросы парниковых газов по секторам экономики в среднем по миру в год

1.Выбросы углекислого газа от энергетики

Выбросы углекислого газа от энергетики в России значительны из-за использования ископаемого топлива, такого как уголь, нефть и природный газ [Tashlykov, 2016]. Россия является одним из крупнейших производителей и потребителей энергии в мире, поэтому уровень выбросов углекислого газа высок. В 2022 г выбросы углекислого газа от энергетики в России составили примерно 1,46 миллиарда метрических тонн CO₂, что свидетельствует о снижении по сравнению с предыдущим годом. Выбросы парниковых газов, связанных с энергетикой по данным Российского национального кадастра антропогенных выбросов представлены на рисунке 2.

2.Экологически чистые станции

На сегодняшний день в соотношении мощность/вред окружающей среде самыми экологически чистыми в мире являются атомные электростанции, а последние полвека использование атомной энергии смогло сократить глобальные выбросы CO₂ на приблизительно 74 Гт. Только гидроэнергетика играла более важную роль в сокращении выбросов в прошлые периоды.

Атомные электростанции с высоким коэффициентом использования мощности (КИУМ) способны обеспечить значительное

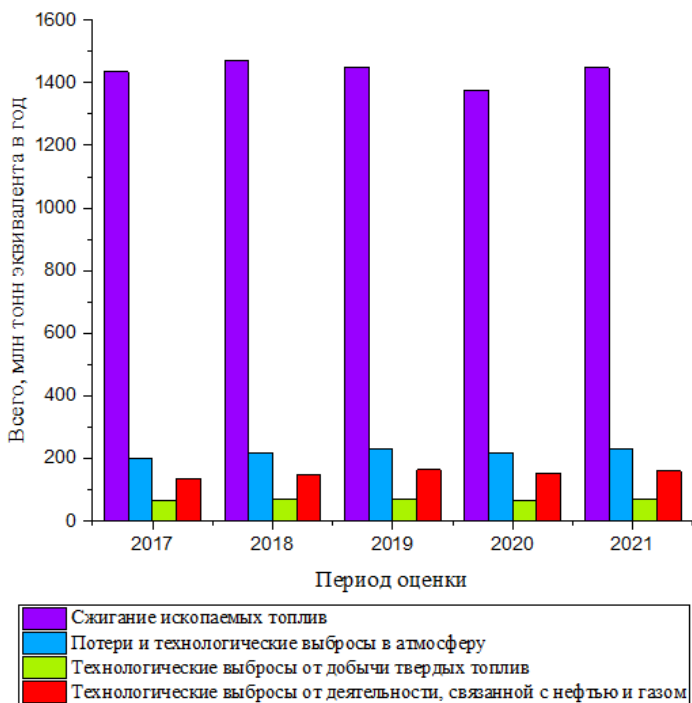


Рис.2. Выбросы парниковых газов, связанных с энергетикой по данным Российского национального кадастра антропогенных выбросов

сокращение выбросов CO_2 по сравнению с угольными и газовыми электростанциями, а также с другими безуглеродными источниками энергии. В отличие от ветровой и солнечной энергетики, производство электроэнергии на АЭС не подвержено влиянию изменчивых погодных условий. АЭС с КИУМ в 85% могут сократить годовые выбросы CO_2 на 7,8 млн тонн при замещении угольных электростанций и на 2,8 млн тонн при замещении парогазовых электростанций. Для солнечных и ветряных электростанций эти показатели составляют примерно 1,5 и 2,5 млн тонн CO_2 соответственно при замещении угольных и 0,5 и 1 млн тонн при замещении парогазовых установок. Атомная энергетика является надежным и важным источником электроэнергии, который критически важен для успешного смягчения последствий изменения климата для России и всего мирового сообщества в целом. Тем не менее около 11% вырабатываемой в мире энергии приходится на АЭС [7]. Согласно изданию "Перспективы развития мировой энергетики" Международного энергетического агентства, ожидается увеличение мощности атомной генерации с 417 ГВт в 2022 г. до 620 ГВт в 2050 г [8]. В России на долю АЭС приходится 20% вырабатываемой электроэнергии. Большая часть

электрогенерации в мире обеспечивается за счет ископаемого (значит не возобновляемого) топлива. Одна атомная электростанция, состоящая из нескольких энергоблоков, вырабатывает от 3,5 до 8,2 МВт. Среднее значение мощности АЭС - 5,3-5,4 МВт, чего вполне достаточно для обеспечения энергией до 5 млн человек. С экологической точки зрения выбросы углекислого газа на АЭС крайне малы по сравнению с другими видами энергетических установок.

3. Технологии использования атомной энергетики

Благодаря новым возможностям ядерные технологии стремительно развиваются, что расширяет сферу применения атомной энергии и углубляет ее интеграцию с другими низкоуглеродными источниками энергии.

«Атомная энергетика переживает поворотный момент своей истории. Все больше стран заявляют о ключевой роли атомной энергетики в развитии низкоуглеродных технологий. Все больше людей признают глобальную роль атомного сообщества в решении климатических проблем, вопросов энергетической безопасности, достижении энергетического равноправия», — отметила гендиректор Всемирной ядерной ассоциации (WNA) Сама Бильбао-и-Леон [9].

Современная атомная электростанция представляет собой ядерную установку, использующую ядерный реактор для производства электрической или тепловой энергии. На данный момент в России находятся в эксплуатации 3 типа реакторов: РБМК, ВВЭР и БН. Топливо для таких реакторов состоит из переработанного урана, плутония и потенциально тория, вместо углеводов. Тепло производится в результате ядерного деления внутри реактора, а не сжигания углеводов. Процесс ядерного деления обладает огромным энергетическим потенциалом и высвобождает примерно в миллион раз больше энергии, чем при сгорании. Существуют три основных класса реакторных технологий: реакторы большой мощности (гигаваттного класса), АЭС малой мощности (АЭСММ) и микрореакторы. Реакторы большой мощности представляют собой хорошо отработанные технологии, доступные на рынке. АЭСММ и микрореакторы находятся в стадии разработки, и некоторые конструкции быстро приближаются к стадии коммерческого внедрения.

Современные реакторы большой мощности могут иметь коэффициент использования установленной мощности свыше 90% и рассчитаны на срок эксплуатации не менее 60 лет. Большинство установок эксплуатируется в режиме базовой нагрузки, чтобы использовать преимущества низких затрат на топливо и эксплуатационных издержек, однако они могут быть адаптированы для целей централизованного теплоснабжения.

Однако в последние годы все больше интереса связано с развитием так называемых атомных станций малой мощности (АСММ), или по западной

классификации SMR (small modular reactors) – малых модульных реакторов. Именно модульность, т.е. высокая степень заводской сборки оборудования в виде отдельных модулей, является важной чертой SMR. Другая особенность – мощность. По классификации Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) к SMR относятся станции электрической мощностью до 300 МВт. Хотя это деление довольно условно и иногда к ним относят и АЭС средней мощности – до 700 МВт. Кроме того, существует отдельная классификация микро-АЭС – до 10 МВт. Атомные станции малой мощности – оптимальное решение для стабильного и экологически чистого энергообеспечения потребителей на отдаленных от центральных энергосетей территориях, а также для замены старых электростанций с повышенным объемом выбросов CO₂ в атмосферу. Такие станции обладают целым рядом преимуществ в дополнение к традиционным плюсам атомной генерации.

4. Инновации в топливном цикле АЭС

Несмотря на низкий углеродный след самих АЭС при добыче урана происходят выбросы CO₂ в результате работы техники, а также выбросы метана, который, как и углекислый газ, задерживает тепло, тем самым мешая планете остывать. С уникальной особенностью ядерной энергетики связана возможность переработки отработанного топлива для извлечения ценных материалов и обеспечения энергией существующих и будущих атомных станций. В настоящее время имеется возможность частичного повторного использования топлива на промышленном уровне, что позволяет получить примерно на 25% больше энергии из первоначально добываемого урана. Замкнутый ядерный топливный цикл - цикл, в котором отработавшее ядерное выгруженное перерабатывается для извлечения урана и плутония для повторного изготовления ядерного топлива. В замкнутом топливном цикле ОЯТ после выдержки во временном хранилище перевозится на перерабатывающий завод для переработки. После переработки наработанный в ОЯТ плутоний, как и оставшийся уран, могут повторно использоваться для производства ядерного топлива (рис.3). При этом только небольшая часть полезного делящегося материала (примерно 1%) в процессе переработки и изготовления ядерного топлива теряется и переходит в радиоактивные отходы. Использование ОЯТ для изготовления топлива способствует более эффективному использованию природного урана, сокращая его затраты на единицу установленной мощности АЭС [Антонов, 2017].

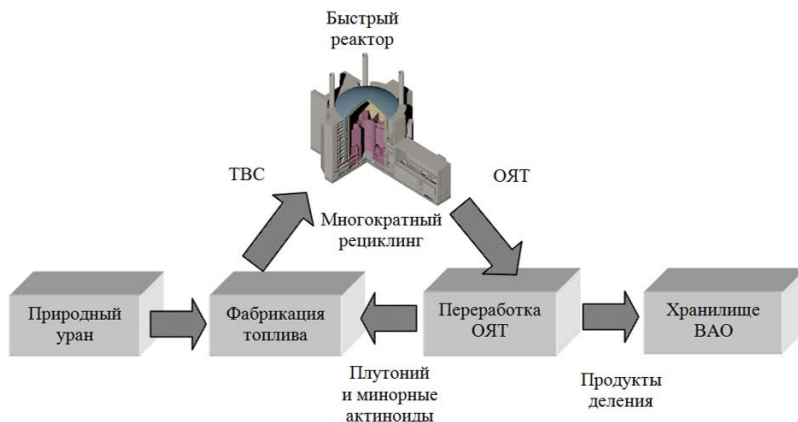


Рис. 3. Топливный цикл на основе быстрых реакторов

Реакторы на быстрых нейтронах способны увеличить добычу энергии из урана на рудниках, увеличивая коэффициент запасов. Коммерциализация и все более широкое распространение реакторов на быстрых нейтронах повлияют на потребности в уране и управление радиоактивными отходами. В настоящее время в России ведутся исследования по нескольким вариантам нового ЯТЦ для решения вопросов ОЯТ и более эффективного использования урана: крупномасштабное развитие АЭ на быстрых реакторах с рециклированием регенерированного урана и плутония [Ташлыков, 2016]; так называемый цикл REMIX (топливо REMIX изготавливается из неразделенной смеси рециклированных урана и плутония, получаемой при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР). В России имеются два действующих реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800), а также планируется сооружение реактора с натриевым теплоносителем мощностью 1200 МВт (БН-1200) наряду с проектом реактора со свинцовым теплоносителем мощностью 300 МВт (БРЕСТ-300). Согласно отчету по экологической безопасности Белоярской АЭС за 2022 год, выброс загрязняющих веществ в атмосферный воздух производился в пределах установленных нормативов. Выбросы оксида углерода за текущий год составили 49,7 тыс. т – это 48% от нормы. Основными источниками выбросов являются котельные, работающие на топливном мазуте. Валовые выбросы от котельных составляют более 98 % выбросов от всех источников Белоярской АЭС [10].

5. Зеленая энергетика

Одним из результатов перехода к низкоуглеродному развитию станет снижение спроса на ископаемое органическое топливо и повышение роли возобновляемых и других зеленых источников энергии. На сегодняшний день в мире нет ни одного объекта, производящего энергию, который был

бы на 100% экологичен. Солнечные панели, ветряки, гидроэнергетика и геотермальная энергия требуют существенных инвестиций в исследования и разработки для повышения эффективности и снижения затрат. Реализация этой цели скажется самым серьезным образом на экономике мира и России. Для того, чтобы энергия стала по-настоящему «зеленой», она вообще не должна оказывать воздействия на окружающую среду. Учитывая, что для строительства любой электростанции ресурсы берутся из недр земли, ущерб экологии оказывается в той или иной мере. Кроме того, при использовании АЭС нужно учитывать такие потенциальные проблемы для экологии как радиоактивное загрязнение, необходимость использования значительного количества воды для охлаждения реакторов и радиоактивные отходы. Поэтому ядерные установки строятся с многочисленными защитными барьерами для обеспечения безопасности людей и окружающей среды от выбросов радиоактивных материалов. Доля радиоактивного излучения, обусловленная атомной энергетикой, составляет менее 0,1%, что намного меньше облучения, с которым сталкиваются в повседневной жизни большинство людей. Крупные аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году и АЭС «Фукусима-1» в 2011 году вызвали огромное беспокойство у мирового сообщества о безопасности эксплуатации атомных станций. Уроки, извлеченные из аварий и других инцидентов, связанных с эксплуатацией ядерных установок, учитываются при проектировании новых реакторов и в ходе их эксплуатации.

Заключение

Энергетика играет ключевую роль в формировании углеродного следа общества и может быть эффективным инструментом для сокращения его влияния на изменение климата. АЭС с высоким КИУМ способны обеспечить значительно большее сокращение выбросов углекислого газа по сравнению с другими безуглеродными источниками. Использование АСММ и замыкание ядерного топливного цикла способно значительно снизить выбросы CO₂.

Список литературы

- [1] Антонов А. Г. Технологии атомной энергетики и ядерного топливного цикла // «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» №16. 2017.
- [2] Tashlykov O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle / O. Tashlykov [et al.] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – V. 190. – No. 2. – Pp. 907-918.
- [3] Ташлыков, О.Л. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 8-9 (172-173).
- [4] Ташлыков О. Л. Основы ядерной энергетики / О.Л. Ташлыков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, – 2016. – 225 с.

- [5] Tashlykov, O. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century / O. Tashlykov [et al.] // International journal of energy production and management. – 2016. – V. 1. – No. 2. – Pp. 133-140.
- [6] Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Шарифьянов Е.В. Инновационное направление развития ядерной энергетики в России и мире (Экологическая приемлемость ядерной энергетики XXI века) // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2020. № 28-30 (350-352).
- [7] Ядерные энергетические реакторы // МАГАТЭ, URL: <https://www.iaea.org/ru/temy/yadernye-energeticheskie-reaktory> (дата обращения: 19.04.2024).
- [8] Международное энергетическое агентство прогнозирует увеличение глобальной мощности атомной генерации с 417 ГВт до 620 ГВт в 2050 году // Атомная энергия 2.0, URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/11/02/140161?ysclid=lvaj3rygt3734451921> (дата обращения: 20.04.2024).
- [9] Поколение IV — уже реальность // Росатом, URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/prityazhenie-atomekspo-na-forume-zaglyanuli-v-chistoe-energeticheskoe-zavtra/> (дата обращения: 20.04.2024).
- [10] Годовой отчет по экологической безопасности Белоярской АЭС (2018) // Росэнергоатом, URL: https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/2fd/2fd9823473ebf8ad2cc483d17f53dd_a0.pdf (дата обращения: 23.04.2024).

ON THE ROLE OF NUCLEAR ENERGY IN SOLVING THE PROBLEM OF DECARBONIZATION OF ENERGY

A.M.Shironina (shironina-03@mail.ru)

I.P.Voronin (ilya_10_voronin@mail.ru)

O.L.Tashlykov (otashlykov@list.ru)

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

Organic fuel energy is one of the main sources of carbon dioxide emissions. Most industrial companies in the world have not achieved their goal of achieving zero emissions. Nuclear power is recognized as one of the most low-carbon energy sources and is the only technology demonstrating the ability to dramatically reduce carbon dioxide emissions. Additional safety and environmental impact minimization requirements are imposed on nuclear power plants, which actualizes the closure of the nuclear fuel cycle.

Keywords: decarbonization, greenhouse gases, carbon-free energy, nuclear power plants, closed nuclear fuel cycle

УДК: 621.315.1

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛЭП НАПРЯЖЕНИЕМ 10 КВ В ВЫСОКОГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

Д.А. Высочанский (*danila.vysochanskiy@mail.ru*)
Севастопольский государственный университет,
Севастополь

Население и промышленные предприятия, расположенные в высокогорной местности, влекут за собой увеличенный спрос на электроэнергию. Однако высокогорные условия характеризуются экстремальными погодными условиями, такими как: сильные ветра, снегопады, грозы и изменчивая температура. Проектирование в таких условиях требует учета особенностей климата и выбора подходящих технических решений. Проектирование эффективных и надежных ЛЭП 10кВ имеет важное значение для обеспечения энергоснабжения в этих районах, и направлено на обеспечение безопасности и надежности работы энергосистемы. Новые методы и технологии проектирования могут повысить стабильность сети и уменьшить вероятность аварий и простоев. Также развитие проектов в области энергетики всё больше ориентировано на экологическую устойчивость. Проектирование ЛЭП 10кВ в высокогорных условиях с учетом экологических аспектов, среди которых минимизация антропогенного воздействия, является важным направлением развития отрасли. В данной статье рассмотрены основные природные и географические особенности высокогорной местности, которые влияют на дальнейшее строительство воздушных линий электропередач на напряжении 10 кВ, а также возможные технические решения, которые могут решить проблему суровых природных условий в высокогорной местности.

Ключевые слова: воздушная линия электропередач, напряжение 10 кВ, проектирование, особенности, высокогорная местность, ветровое давление, строительство.

Введение

Воздушные линии электропередач – это системы передачи электроэнергии, использующие воздушное пространство для транспортировки электрического тока. Напряжение 10 кВ является одним из наиболее распространенных и эффективных вариантов для передачи электроэнергии на средние расстояния.

Воздушные линии обеспечивают надежную и эффективную передачу электроэнергии даже в сложных условиях, что делает их неотъемлемой частью энергетической инфраструктуры горных регионов, где строительство подземных трасс является трудновыполнимой задачей в силу высоких расходов и сложности рельефа. Кроме того, использование воздушных линий позволяет быстро и экономично решать проблемы с поставкой электроэнергии в удаленных и труднодоступных районах, где другие способы передачи энергии могут оказаться неэффективными.

Климатические факторы являются основными исходными условиями, которые учитываются при проектировании, расчетах, эксплуатации любых ЛЭП. В условиях горной и высокогорной местности необходимо учитывать основные факторы: ветровое воздействие, обледенение и обильные осадки, лавины и оползни. Поэтому рассмотрение природных особенностей при проектировании и строительстве воздушных линий электропередач в горных условиях существенно влияет на надежность и эффективность энергоснабжения.

1. Ветровое воздействие

Влияние ветровых воздействий является серьезным фактором. По метеорологическим данным более 44% ущерба ВЛЭП произошло от ветровых воздействий. Основными причинами аварий были ошибки в расчетах ветровой нагрузки и соответственно неправильное распределение нагрузки по сооружению. Для определения действий ветра перед проектированием необходимо знать:

- расчетную скорость ветра;
- порывистость ветра;
- вероятность ветров различной силы;
- профиль ветра по высоте;
- «розу ветров».

Согласно ПУЭ п.2.5.38 проектирование ВЛЭП должно выполняться на основании карт климатического районирования территории РФ.

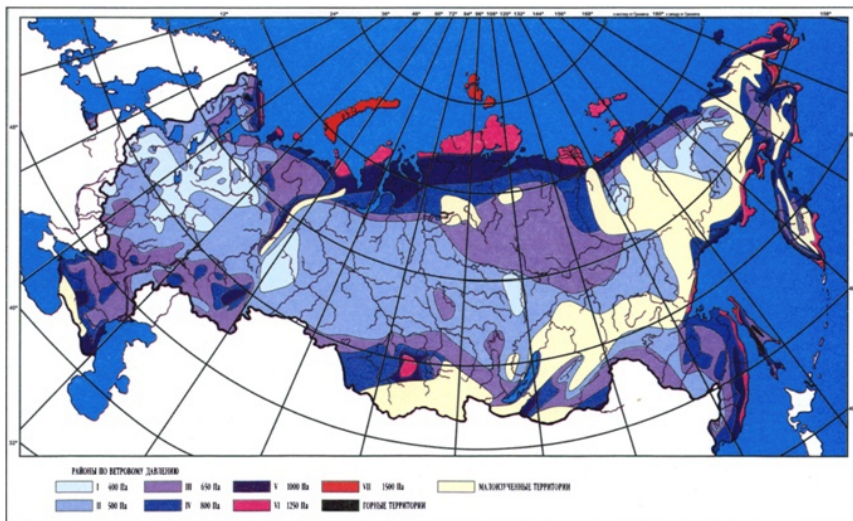


Рис. 1 Карта районирования территории РФ по ветровому давлению

Чем больше период свободных колебаний конструкции, тем больше будут проявляться динамические воздействия пульсаций и связанных с ними порывов ветра.

Основное влияние ветра на работу воздушной линии является его давление на провода, тросы, опоры. Создается поперечная нагрузка на провода и тросы, из-за чего ветер увеличивает их натяжение, большая ветровая нагрузка может вызвать поломку и падение опор, и иногда с вырыванием фундамента из земли.

Расчет механической прочности опор и проводов ЛЭП проводят для воздействий ветра со скоростью больше (25-30 м/с и выше), когда воздушный поток становится неоднородным по своему строению и наблюдаются порывы ветра. Частицы воздуха совершают турбулентное движение, это приводит к пульсации скоростного напора.

При шквалистом ветре от 12 м/с и выше обрывает линии электропередач. Каждый год фиксируются случаи аварийных ситуаций связанных с обрывом провода из-за ветра. Самые частые обрывы замечены в Москве, на Сахалине, Камчатке и в Алтайском крае.

В качестве решения уменьшения ветровых нагрузок на провода ЛЭП, можно устанавливать опоры более часто, из-за чего длина провода станет меньше, и общая устойчивость конструкции будет надежнее.

2. Обледенение

Гололедные образования включают в себя: иней, изморозь (кристаллическую и зернистую), гололед и смешанные образования из гололеда и изморози. Для проводов ЛЭП иней и кристаллическая изморозь

не оказывает существенного воздействия, не оказывает дополнительной нагрузки и не влияет на механическую прочность.

Зернистый иней, лёд или их смесь могут привести к более тяжелым условиям эксплуатации проводников. Зернистый иней – это рыхлый, похожий на снег лёд, который скапливается на наветренной стороне проводников, в основном в туманную и ветреную погоду.

Согласно ПУЭ п.2.5.38 проектирование ВЛЭП должно выполняться на основании карт климатического районирования территории РФ.

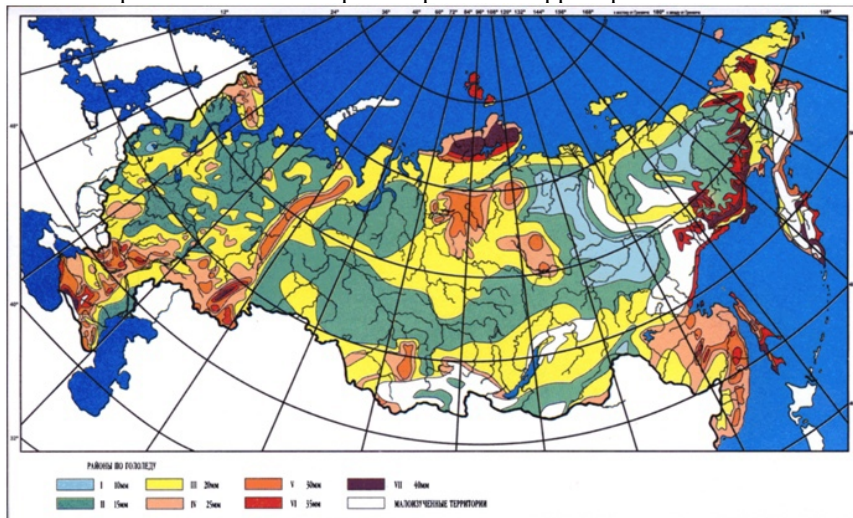


Рис. 2 Карта районирования территории РФ по толщине стенки гололеда

Гололед - это плотный слой льда, который образуется в основном на наветренных линиях электропередач при замерзании переохлажденных капель дождя и мороси (наблюдается при температуре 0-3°C, при более низких температурах может опускаться до -16°C). Толщина ледяной корки может достигать нескольких сантиметров.

Налипание инея и льда часто бывает односторонним. Лед и толстый слой инея часто прилипают к электрическим проводам. Покрытые инеем, льдом и снегом провода имеют большую вертикальную нагрузку и, соответственно, большую площадь, на которую воздействует ветер.

При температуре -5 °C чаще всего образуется изморозь. Когда ветер дует перпендикулярно линии, изморозь откладывается на подветренной стороне провода. Поверхность провода, покрытая изморозью, начинает увеличиваться по мере того, как провод вращается под тяжестью изморози. Если направление ветра направлено вдоль линии, провод будет равномерно покрыт инеем по всей поверхности.

На проводах линий электропередачи наблюдаются смешанные явления, например, на гололед может нарастать изморозь, а свободные пространства

между иглами изморози заполняются снегом. В больших объемах на проводах может удерживаться только мокрый снег, т.к. сухой снег будет спадать под действием ветра.

Количество изморози и гололеда, образующихся на проводах, зависит от местных климатических условий. Толщина смеси гололеда с изморозью в горных и предгорных районах может достигать 70 мм, а при чередующихся наслоениях может быть вдвое больше. Нарастание смеси происходит в течение нескольких суток.

В настоящее время эффективно применяется тепловой метод борьбы с обледенением проводов. При данном методе электрический ток используется для нагрева проводов, вследствие чего провода не подвергаются обледенению.

Также можно использовать другие методы:

- термодинамическое воздействие путём предварительного разогревания до формирования подтопленной прослойки между проводом и ледяной муфтой и последующего «встряхивания проводов силой Ампера», возникающей при пропускании мощного импульса тока;
- электромеханическое воздействие путём периодического пропускания импульсов тока, вызывающих механические колебания проводов и разрушение гололёдной муфты; эффективность электромеханических воздействий усиливается при таких параметрах импульсов тока, которые вызывают механический резонанс;
- механическое воздействие путём перемещения шнеков вдоль провода с использованием энергии ветра, энергию электромагнитного поля фазного тока ВЛ., постоянных магнитов, линейного асинхронного двигателя или создания вибраций проводов с помощью генератора механических колебаний (в дальнейшем не рассматриваются, поскольку практически не используются).

В качестве способа уменьшения воздействий обледенения на ЛЭП можно применять гидрофобное покрытие проводов.

3. Оползни и лавины

В горных районах необходимо принимать меры по защите столбов от лавин, обвалов и разрушений горными потоками, чтобы обеспечить безаварийную работу линий электропередачи.

Лавины характерны для горных районов с большим количеством осадков и представляют собой массы снега и горных пород, которые сползают по горным склонам, достигая ширины в несколько сотен метров.

Наблюдения и исследования показали, что давление падающих лавин, измеренное специальным оборудованием, может достигать десятков тонн на 1 м².

Многолетние наблюдения за характером и последствиями ледников, горных и снежных лавин показывают, что лавины могут вызывать обширные повреждения и завалы даже в верховьях гор и на значительных расстояниях от трасс ЛЭП.

Оползни и лавины различаются по характеру повреждений линий электропередач. Так, провода и опоры ЛЭП повреждаются при ураганных лавинах с пыльными бурями. При горных лавинах, снежных лавинах и оползнях происходит опрокидывание опор и даже разрушение их фундаментов.

Например, на линии электропередачи 110 кВ, питающей один из курортов, оползень сместил один из столбов с проектной разметки, и земля сместила его на несколько метров от оси линии.

На другой линии электропередачи 35 кВ оползень прошел по значительной части линии, вызвав значительное смещение семи опор, что привело к увеличению пролетов между столбами и обрыву проводов, так как провода не выдержали нагрузки от смещения стоек. Несколько опор были повреждены, а некоторые накренились, что сделало линию непригодной для использования в течение длительного периода времени.

Поэтому при проектировании горных ЛЭП маршруты выбираются исходя из условий защиты ЛЭП и удобства эксплуатации в районах, подверженных оползням, постоянным обвалам горных пород, лавинам и эрозии, вызываемой горными потоками.

Учитывая сложный рельеф горных районов, включая глубокие ущелья и крутые склоны, при изысканиях и строительстве ЛЭП учитываются дополнительные углы поворота трассы с использованием наиболее экономичного варианта обхода в горных районах.

Защитные сооружения строятся после тщательного изучения лавинной опасности и с учетом влияния реальной ситуации. Однако реальные значения лавинной силы не всегда могут быть точно определены, поэтому принятая конструкция защитного сооружения в некоторых случаях может оказаться неэффективным средством защиты опоры.

Проектирование защитных сооружений зависит от особенностей трассы.

В качестве защитных сооружений от ожидаемого схода лавин используются монолитные бетонные фундаменты с клинообразными железобетонными оголовками. Для строительства оголовков используется высокопрочный морозостойкий бетон. При надежном закреплении в грунте такие монолитные защитные сооружения способны выдерживать лавинное давление в несколько десятков тонн на 1 м².

Если лавинное давление промежуточных и анкерных металлических опор на сборных железобетонных основаниях не превышает 10 тонн, на каждом основании возводится защитное сооружение более высокого типа. Для увеличения жесткости и улучшения крепления к грунту подножия соединяются общей рамной конструкцией.

На участках, подверженных воздействию лавин плотностью 5 тонн/м² и менее, рекомендуется использовать клиновидные защитные стены из каменной кладки. Глубину и высоту клиновидных защитных стен следует выбирать в зависимости от давления лавины. Высота стен защитного сооружения зависит от предполагаемой оси лавины и выбирается таким образом, чтобы остановить ее движение.

При обнаружении в эксплуатационных условиях вновь образовавшихся лавин или оползней в качестве защитных сооружений применяют клиновидные железобетонные защитные стенки, устанавливаемые перед крепью и предназначенные либо для расчета общего давления лавины, либо для отклонения лавины в сторону от крепя.

Заключение

В результате исследования были рассмотрены основные природные факторы, которые оказывают наибольшее воздействие на воздушные линии электропередач, и приведены возможные решения для каждого фактора, вызывающего проблему. Это исследование поможет в будущем инженерам-проектировщикам при строительстве воздушной линии электропередач в горной и высокогорной местности:

1. При ветре от 12 м/с и выше обрывает линии электропередач. В качестве решения можно ставить опоры более часто.
2. В качестве способа уменьшения воздействий обледенения на ЛЭП можно применять гидрофобное покрытие проводов.
3. В настоящее время эффективно применяется тепловой метод борьбы с обледенением проводов.
4. В качестве защитных сооружений от ожидаемого схода лавин используются монолитные бетонные фундаменты с клинообразными железобетонными оголовками.

Список литературы

- [1] Кочкин, Н.В. Строительство высоковольтных воздушных линий электропередач в различной местности // Инновационная наука. 2018.
- [2] Горбина, Е.В. Уменьшение климатических воздействий на ЛЭП // Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016.
- [3] Калматов Чынгыз, Лопухова, Т.В. Особенности сооружения и эксплуатации ЛЭП высокого напряжения в высокогорных условиях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015.

DESIGN FEATURES OF 10 KV OVERHEAD POWER LINES IN HIGH-ALTITUDE AREAS

D.A. Vysochanskiy (*danila.vysochanskiy@mail.ru*)
Sevastopol State University, Sevastopol

The population and industrial enterprises located in the highlands entail an increased demand for electricity. However, high-altitude conditions are characterized by extreme weather conditions such as: strong winds, snowfall, thunderstorms and variable temperatures. Designing in such conditions requires taking into account the peculiarities of the climate and choosing suitable technical solutions. The design of efficient and reliable 10kV transmission lines is essential to ensure energy supply in these areas, and is aimed at ensuring the safety and reliability of the power system. New design methods and technologies can improve network stability and reduce the likelihood of accidents and downtime. Also, the development of energy projects is increasingly focused on environmental sustainability. Designing a 10kV transmission line in high-altitude conditions, taking into account environmental aspects, including minimizing anthropogenic impact, are an important area of industry development. This article discusses the main natural and geographical features of the highlands, which affect the further construction of overhead power lines at a voltage of 10 kV, as well as possible technical solutions that can solve the problem of harsh natural conditions in the highlands.

Keywords: overhead power line, 10 kV voltage, design, features, high-altitude terrain, wind pressure, construction.

УДК: 621.31

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

А.С. Ливен (*livenas@kuzstu.ru*)

Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово
Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина

Ф.С. Непша (*nepshafs@kuzstu.ru*)

Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово

В последнее десятилетие наблюдается тенденция к удешевлению технологий накопления электрической энергии, что стимулирует потребителей электрической энергии к их применению с целью повышения надежности электроснабжения, снижения платы за электроснабжение и повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии. В связи с этим, в настоящем докладе рассматриваются вопросы моделирования электротехнического комплекса потребителей для оценки технико-экономической эффективности внедрения систем накопления электрической энергии (СНЭЭ). Приведено описание технических и рыночных параметров, которые оказывают влияние на технико-экономическую эффективность применения СНЭЭ. Сделан вывод о целесообразности оценки технико-экономической эффективности применения СНЭЭ с учетом технических ограничений и региональных особенностей.

Ключевые слова: системы накопления электрической энергии, алгоритм управления СНЭЭ, управление потреблением

Введение

Возрастающая доля генерации на ВИЭ, рост потребления электроэнергии и его неравномерности в абсолютном выражении усложняет задачу управления режимами в энергосистеме. Применение СНЭЭ на уровне магистральных и распределительных сетей может решать

множество задач по регулированию режимных параметров, за счет выполнения следующих функций [Илюшин и др., 2021]:

- Вращающийся резерв;
- Регулирование частоты;
- Поддержание напряжения;
- Ликвидация перегрузок ЛЭП;
- Перенос сроков сетевого строительства.

Однако, участие в решении задач, связанных с неравномерным потреблением, доступно и СНЭЭ в составе электротехнических комплексов (ЭТК) потребителей электроэнергии, за счет применения механизмов системных услуг и рыночных механизмов, также уже планируется запуск рынка управления спросом.

В данной работе исследуются вопросы применения СНЭЭ в условиях существующей системы ценообразования на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ЭЭ и М) РФ. В данной работе поставлена задача описать технические и экономические факторы, определяющие целесообразность применения СНЭЭ в составе ЭТК потребителя для снижения платы за услуги электроснабжения, а также выполнить расчет режима работы системы и построить финансово-экономическую модель такого проекта.

1. Методология

1.1 Описание объекта моделирования

На рисунке 1. показана обобщенная структура ЭТК потребителя электроэнергии.

С точки зрения потребителя, главным приоритетом является окупаемость инвестиций в проект установки СНЭЭ. Далее перечислены возможные механизмы окупаемости таких проектов [Илюшин и др., 2021]:

- Снижение затрат на оплату генераторной или генераторной плюс сетевой мощностей (3-6 ценовая категория);
- Увеличение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) генерации на ВИЭ;
- Снижение ущерба от перерывов электроснабжения.

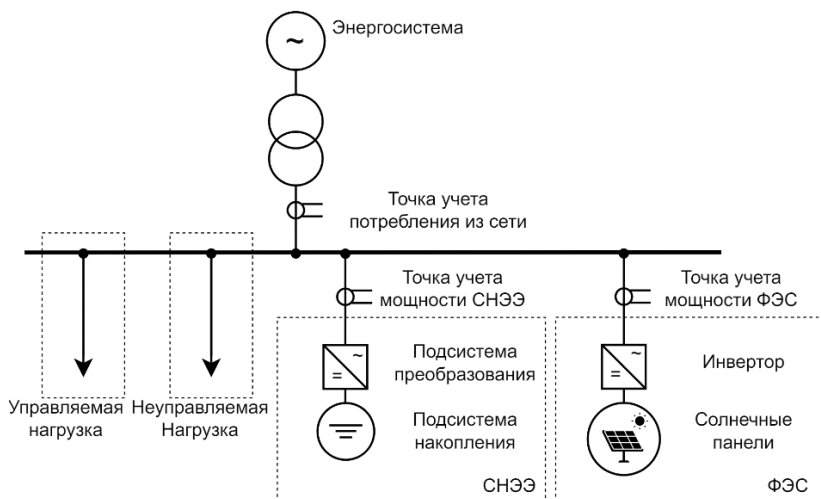


Рис. 1. Схема ЭТК потребителя электроэнергии

В данной работе рассматривается ЭТК включающий:

- СНЭЭ 6800 кВт·ч, 6120 кВт;
- неуправляемую нагрузку (суточный профиль показан на рисунке 2)
- связь с энергосистемой (покупка электроэнергии по 4 ценовой категории).

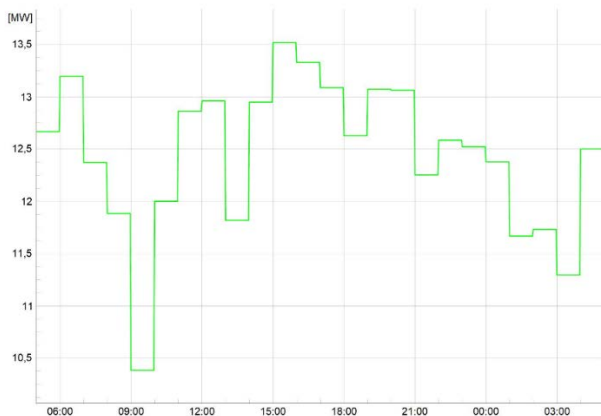


Рис. 2. Суточный профиль нагрузки рассматриваемого потребителя

1.2 Оплата генераторной мощности

Плата за генераторную мощность определяется потреблением из сети в час пиковой нагрузки (ЧПН). ЧПН является отчетным параметром и публикуется постфактум, что делает необходимым его прогнозирование.

Согласно выводам [Воронин и др., 2023; Maryasin et al., 2021] точность возможного прогноза крайне зависит от региона РФ. Так, в одном случае необходимо применять прогнозные модели с машинным обучением для достижения точности чуть выше 50%, тогда как для других регионов достаточно просто выбрать наиболее часто встречающийся час по ретроспективным данным и добиться точности в 80%. Таким образом, эффективность применения СНЭЭ для снижения платы за генераторную мощность определяется следующими условиями:

- точность прогноза ЧПН (крайне зависит от региона РФ);
- тариф на генераторную мощность.

1.3 Оплата сетевой мощности

Плата за сетевую мощность определяется наибольшим потреблением из сети в интервалах плановых часов пиковой нагрузки (ПЧПН) в течение дня. Данные о ПЧПН публикуются заранее и могут быть использованы для планирования работы СНЭЭ. Как правило, это два непрерывных диапазона в течение рабочего дня, суммарной длительностью 10–12 часов. Для успешного планирования работы СНЭЭ в интервалах ПЧПН необходимо выполнять прогноз собственного потребления. При этом наличие разрывов в диапазоне ПЧПН позволяет подзаряжать накопитель, увеличивая там самым потенциал к снижению платы. Таким образом, можно обозначить следующие параметры, определяющие эффективность применения СНЭЭ для снижения платы за сетевую мощность:

- наличие и точность прогноза собственного потребления;
- тариф на сетевую мощность;
- наличие в данном месяце разрывов ПЧПН-диапазона.

1.4 Описание алгоритма управления СНЭЭ

Лучшим сценарием для снижения платы за сетевую мощность является максимальное выравнивание и снижение нагрузки в ПЧПН-диапазоне до некоторой уставки. При этом выбранная уставка должна быть обеспечена в течение всего диапазона ПЧПН, так как даже один час с потреблением выше уставки не позволит снизить плату и сделает снижение в остальные часы бессмысленным. Чем ниже выбрана уставка, тем сильнее снижение платы, но тем выше требуемая энергоемкость СНЭЭ. Для определения возможной уставки при заданном значении энергоемкости необходимо выполнять прогноз собственного электропотребления с часовой дискретизацией.

Для вычисления уставки в данной работе использован следующий подход. В первую очередь определяется наименьшее прогнозное потребление в течение ПЧПН-диапазона – $P_{\text{мин.ПЧПН}}$. Затем вычисляется необходимая энергия для снижения потребления до этого значения по выражению:

$$E = \sum_{\text{ПЧПН}} P_{\text{нагр}} - P_{\text{мин.ПЧПН}} \times N_{\text{ПЧПН}}, \quad (1.1)$$

где $\sum_{\text{ПЧПН}} P_{\text{нагр}}$ – суммарное потребление в диапазоне ПЧПН, МВт·ч;
 $N_{\text{ПЧПН}}$ – кол-во ПЧПН, часов.

Далее, уставка может быть определена по выражению:

$$P_{\text{уст.}} = P_{\text{мин.ПЧПН}} + (E - E_{\text{ess}}) / N_{\text{ПЧПН}}, \quad (1.2)$$

где E_{ess} – доступная энергоемкость СНЭЭ.

Рассчитанная таким образом уставка предполагает, что суммарное энергия отдаваемая СНЭЭ в диапазоне ПЧПН равна E_{ess} . Также важно отметить, что внепиковые часы в разрыве диапазона ПЧПН могут быть использованы для подзарядки СНЭЭ, что позволит добиться меньшего значения уставки с той же энергоемкостью. Однако важно отметить, что это приведет к увеличению циклов заряда и разряда в течение дня, что негативно скажется на сроке службы СНЭЭ. Для использования таких внепиковых часов, описанный алгоритм расчета уставки выполняется отдельно для обоих ПЧПН-диапазонов в течение дня и выбирается наибольшее получившееся значение. Выбор наибольшей уставки означает, что в течение одного из ПЧПН-диапазонов будет израсходована не вся энергия СНЭЭ – этот остаток можно использовать для разряда в ЧПН. Также ввиду того, что для расчета уставки используется прогноз потребления, расчетную уставку следует повысить для отстройки от неточности прогноза.

При наличии прогноза ЧПН существует два базовых сценария для работы СНЭЭ – разряд в наиболее вероятный час и разряд пропорционально вероятности ЧПН в данном часу. Также важно учитывать возможность заряда СНЭЭ в промежутке между пиковыми часами, что позволит выполнить полный разряд СНЭЭ в два наиболее вероятных ЧПН в течение дня.

Выше описаны две стратегии управления СНЭЭ, сформулированные отдельно друг от друга, для снижения платы за генераторную и сетевую мощность, каждая из которых может быть применена как таковая для успешного снижения оплаты услуг электроснабжения. При этом непосредственное совмещение этих стратегий невозможно, т. к. управление осуществляется одним СНЭЭ с единой энергоемкостью. Для совмещения стратегий выполнено условное разделение энергоемкости СНЭЭ на две части, которые будут зарезервированы для использования обеими стратегиями. Введем коэффициент, отражающий пропорцию разделения энергоемкости:

$$K_{\text{ЧПН}} = E_{\text{ЧПН}} / E_{\text{ess}}, \quad (1.3)$$

Алгоритм определения уставки (представлен на рисунке 3а) выполняется для каждого непрерывного ПЧПН-диапазона в течение суток, один раз в начале дня. Алгоритм управления СНЭЭ при совмещении ПЧПН и ЧПН алгоритмов, представленный на рисунке 3б, выполняется каждый час для определения мощности СНЭЭ P_{ess} .

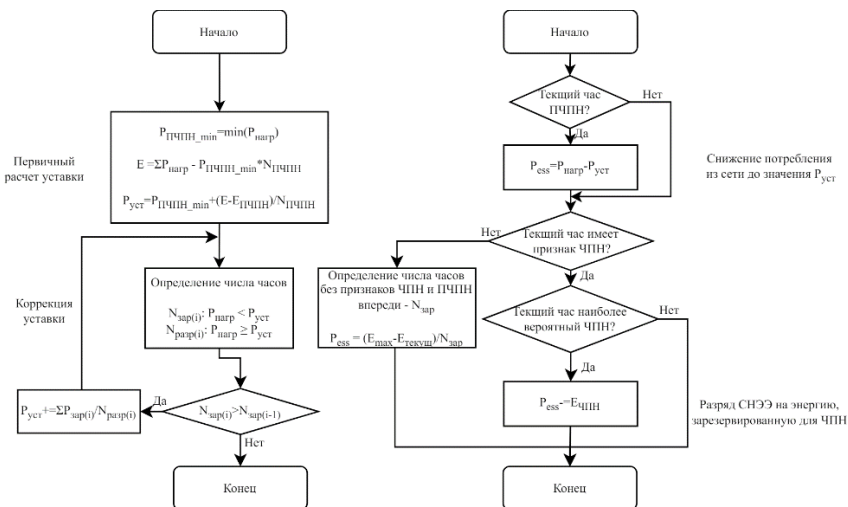


Рис. 3. Алгоритм выбора уставки (а), алгоритм управления СНЭЭ (б)

2. Обсуждение результатов

Для выполнения расчета годовой экономии от применения СНЭЭ приняты следующие исходные данные:

- вероятности наступления ЧПН приняты по ретроспективным данным для рассматриваемого региона;
- неточность прогноза потребления не учитывалась.

Расчет снижения платы за электроэнергию выполнен для разных коэффициентов $K_{ЧПН}$, результаты приведены на рисунке 4.

Наличие экстремума в этой зависимости можно объяснять с точки зрения удельных эффектов (отношения величины экономии к единице используемой энергии). Для алгоритма снижения платы за генераторную мощность удельный эффект является постоянным – увеличение мощности разряда СНЭЭ в ЧПН в 2 раза приведет к 2-кратному увеличению экономии. При этом величина удельного эффекта остается постоянной вплоть до снижения потребления в ЧПН до 0. Однако для алгоритма снижения платы за сетевую мощность удельный эффект будет разным при разных значениях $P_{уст}$. Удельный эффект будет зависеть от количества часов, в течение которых необходимо осуществлять разряд для достижения выбранной уставки. Характер этой зависимости продемонстрирован на рисунке 5.

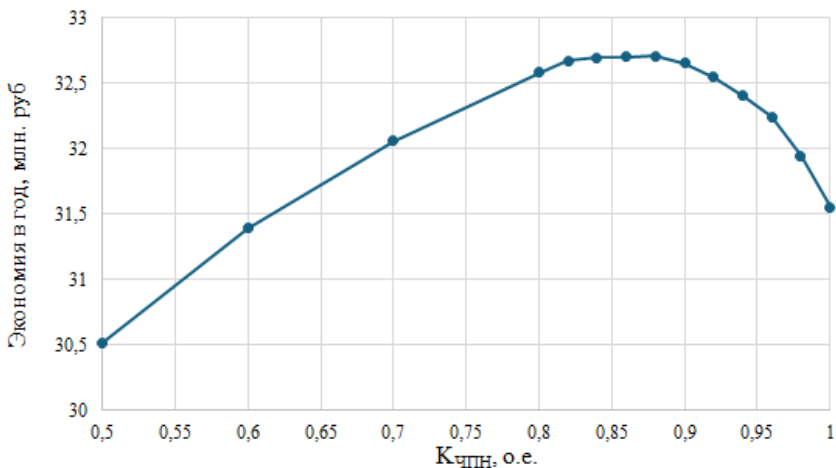


Рис. 4. Зависимость годовой экономии от коэффициента $K_{\text{чпн}}$

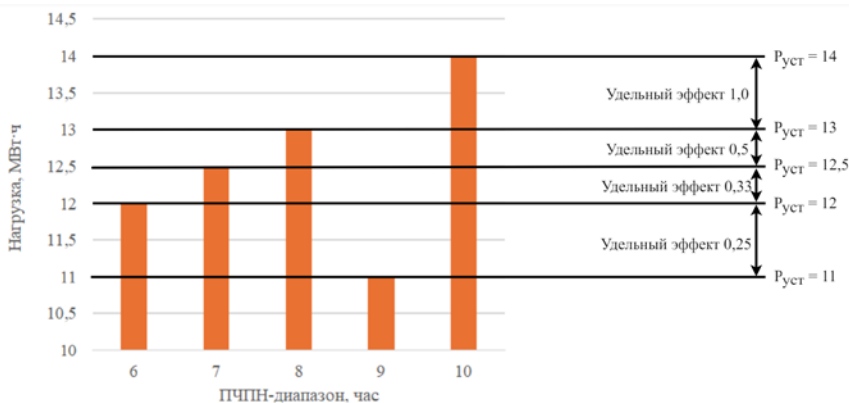


Рис. 5. Зависимость удельного эффекта алгоритма ПЧПН от установки

В рассмотренном случае наибольший эффект снижения платы за электроснабжение наблюдается при значении $K_{\text{чпн}} = 0,88$. Далее, с учетом этого значения, выполнено построение ФЭМ проекта.

Стоимость установки СНЭЭ 6,8 МВт·ч оценена в 204 млн. рублей. Для расчета чистого приведенного дохода (NPV) проекта ФЭМ учитываются экономические параметры, представленные в таблице 1. Результат расчета NPV представлен на рисунке 6.

Табл. 1.

Капитальные затраты на установку СНЭЭ (CAPEX)	Операционные затраты на обслуживание СНЭЭ (ОРЕХ)	Ставка дисконта
30 000 руб./кВт·ч	2% от CAPEX в год	16%

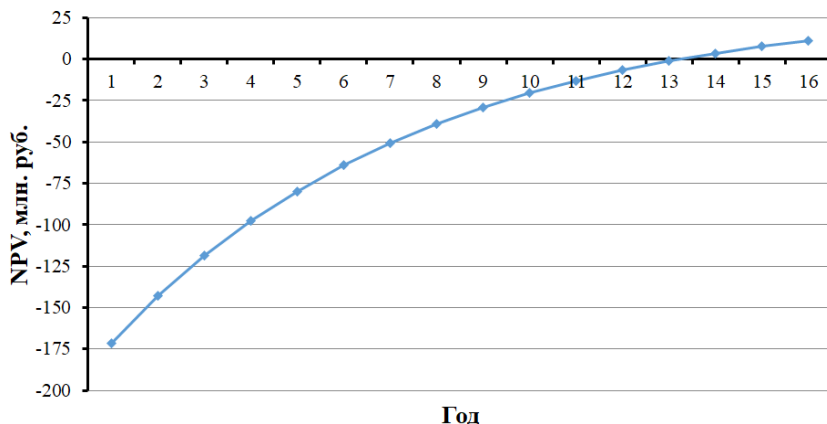


Рис. 6. NPV проекта

Заключение

Данная работа посвящена вопросам применения СНЭЭ в составе ЭТК потребителей электроэнергии, имеющих связь с энергосистемой. Описаны основные факторы, определяющие эффективность применения СНЭЭ для снижения платы за услуги электроснабжения. На основе описанных факторов сформулированы основные требования к управлению СНЭЭ для снижения платы за сетевую и генераторную мощности. Выполнена серия расчетов для оценки эффективности совместного учета механизмов ЧПН и ПЧПН при управлении СНЭЭ. Выполнена технико-экономическая оценка эффективности установки СНЭЭ с целью снижения платы за услуги электроснабжения.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Список литературы

- [1] Воронин В. А., Непша Ф. С. Прогнозирование часов пиковой нагрузки региональной энергосистемы с использованием методов машинного обучения // Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики 2023.

- [2] Илюшин П. В., Шавловский С. В. Механизмы Окупаемости Инвестиций В Системы Накопления Электрической Энергии При Их Использовании Для Снижения Пиковых Нагрузок И Затрат На Мощность // Релейная Защита и автоматизация 2021. № 1 (42).
- [3] Maryasin O. Yu., Lukashov A. I. Analyzing and Forecasting Peak Load Hours // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2021.

Issues of using electrical energy storage systems as part of electrical systems of consumers

A.S. Liven (*livenas@kuzstu.ru*)
Kuzbass State Technical University
named after T. F. Gorbachev, Kemerovo
Ural State University, Ekaterinburg

F.S. Nepsha (*nepshafs@kuzstu.ru*)
Kuzbass State Technical University
named after T. F. Gorbachov, Kemerovo

In the last decade, there has been a trend towards cheaper electric energy storage technologies, which encourages consumers of electric energy to use them in order to increase the reliability of power supply, reduce electricity fees, and increase the efficiency of using renewable energy sources. In this regard, this article examines the issues of modeling the electrical complex of consumers to assess the technical and economic efficiency of introducing electric energy storage systems (EES). A description of the technical and market parameters that influence the technical and economic efficiency of ESS is provided. A conclusion is made about the feasibility of assessing the technical and economic efficiency of using ESS, taking into account technical limitations and regional characteristics.

Keywords: energy storing systems, ESS management algorithm, demand management

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.А. Горшунов (*98sever@mail.ru*)

Ю.А. Секретарев (*sekretarev@corp.nstu.ru*)
Новосибирский государственный технический
университет, Новосибирск

В работе рассматривается использование метода Монте – Карло для моделирования технического состояния электрооборудования систем электроснабжения. Созданная математическая модель учитывает появление дефектов во время эксплуатации электрооборудования. Реализован алгоритм в виде программного комплекса для автоматизированного расчета структурной надежности систем электроснабжения с учетом текущего технического состояния электрооборудования. Для примера выполнен расчет надежности существующих схем электроснабжения на основе статистической информации об отказах электрооборудования.

Ключевые слова: *индекс технического состояния, моделирование мониторинга за техническим состоянием, системы электроснабжения, автоматизированный расчет.*

Введение

Целью исследования является оценка влияния текущего состояния электрооборудования на надежность систем электроснабжения промышленных предприятий. Для проведения расчетов надежности систем электроснабжения была выполнена обработка статистической информации об отказах электрооборудования в рассматриваемых системах электроснабжения за 10 лет эксплуатации. Была разработана математическая модель, позволяющая получить оценку текущего технического состояния электрооборудования. Произведен расчет комплексного показателя надежности с учетом текущего состояния элементов схем электроснабжения. Выполнено сравнение расчетов надежности с учетом и без учета информации о техническом состоянии элементов схем.

1. Теория вопроса

Оценить степень текущего технического состояния электрооборудования в системах электроснабжения возможно с помощью интегрального показателя – индекса технического состояния (ИТС). Методика расчета данного показателя приводится в документе Минэнерго России [Приказ, 2017].

Отсутствие статистической информации о техническом состоянии электрооборудования на объектах энергетики вынуждает применять аппарат экспертных оценок и разрабатывать математические модели, позволяющие оценить влияние текущего технического состояния электрооборудования на надежность систем электроснабжения [Секретарев, 2023].

1.1 Общая математическая модель оценки текущего технического состояния электрооборудования

Для применения ИТС в расчетах надежности предлагается использовать математическую модель (1.1):

$$J_{k.un.eq} = \sum_1^j V_j \times J_{j.f.n} = \sum_1^j \left(V_j \times \sum_1^i (O_i \times V_i) \right). \quad (1.1)$$

Весовой коэффициент значимости (V_j) функционального узла (N_j) представляет собой числовое значение (оценку) уровня значимости (важности) определенного функционального узла в составе единицы электрооборудования. Индекс технического состояния ($J_{j.f.n}$) функционального узла (N_j) – расчетное значение текущего технического состояния рассматриваемого функционального узла, данное значение рассчитывается на основе данных о техническом состоянии составных частей функционального узла (деталей). Весовой коэффициент (оценка) (O_i) состояния детали (D_i) – числовое значение, показывающее текущее техническое состояние детали в составе некоторого функционального узла (N_j). Весовой коэффициент значимости (V_i) детали (D_i) – числовое значение (оценка) уровня значимости (важности) определенной детали (D_i) в составе функционального узла (N_j). Количество деталей (D_i) в составе функционального узла (N_j) ограничено числом i . Количество функциональных узлов (N_j) в составе единицы оборудования (E_{qk}) ограничено числом j .

Для определения весовых коэффициентов может быть применен аппарат экспертных оценок. Условно единицу электрооборудования можно представить в виде схемы, представленной на рис. 1.

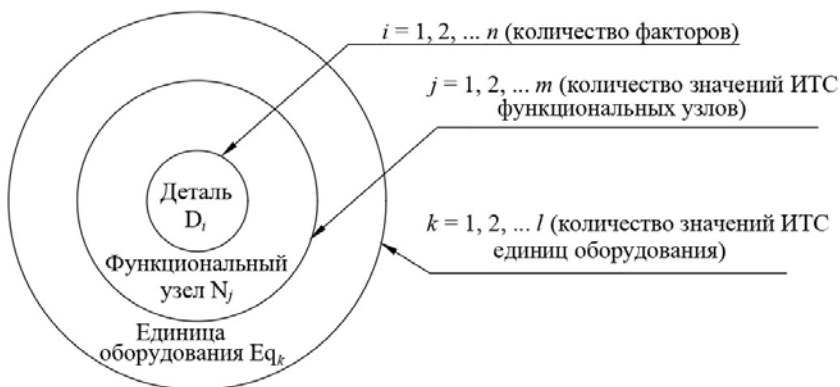


Рис. 1 – Структурная схема единицы электрооборудования

1.2 Математическая модель для генерирования ИТС на основе метода Монте-Карло

Для генерирования значений ИТС функциональных узлов была разработана и реализована в виде программного комплекса математическая модель (1.2):

$$J_{k.un.eq} = \sum_1^j \left(\frac{\sum_1^n RANDOM}{n} \right) \times V_j. \quad (1.2)$$

На сегодняшний день отсутствует статистическая информация о развитии дефектов, влияющих на отказы электрооборудования. Это позволяет сделать предположение о случайности данного процесса. Для моделирования дефектов применяется генератор псевдослучайных чисел (*RANDOM*) в диапазоне от 0 до 1 включительно для имитации случайной величины, подчиняющейся равномерному закону распределения, при количестве испытаний n .

Программный комплекс позволяет имитировать автоматизированное рабочее место (АРМ). Комплекс имеет три рабочих блока. Первый блок позволяет производить классические расчеты надежности с применением метода блок – схем и использованием известных значений параметра потока отказов и среднего времени восстановления. Второй блок включает в себя генератор псевдослучайных чисел, который позволяет применить метод Монте – Карло при моделировании ИТС. Третий блок позволяет рассчитать надежность системы электроснабжения с учетом технического состояния электрооборудования [Секретарев, 2022]. Условно блоки представлены на рис. 2.



Рис. 2 – Блок-схема работы программного комплекса

2. Ход исследования

За 10 лет эксплуатации в рассмотренных сетях было выявлено 748 отказов на линиях электропередач. Параметр потока отказов составил $\omega = 0,08 \text{ год}^{-1}$. Среднее время восстановления составило 3,8 часа. Данная статистика была собрана за определенные годы эксплуатации электрооборудования и расчеты надежности с данными показателями не отражают текущее техническое состояние сетей.

Вероятность безотказной работы любой схемы электроснабжения может быть рассчитана с помощью формулы Пуассона (2.1):

$$P = e^{-\varphi T}. \quad (2.1)$$

Вероятность безотказной работы и текущее состояние электрооборудования с точки зрения теории вероятностей считаются событиями независимыми [Вентцель, 2001]. Чтобы принять во внимание текущее техническое состояние электрооборудования рассматриваемой системы электроснабжения следует применять формулу (2.2):

$$P_{ТСИ} = P \times J_{k.un.eq}. \quad (2.2)$$

При принятии решения о выводе единицы электрооборудования в плановый ремонт может быть применен риск – ориентированный подход. Задача о решении по выводу электрооборудования в плановый ремонт является оптимизационной, где в качестве критерия оптимизации может быть принят критерий минимизации отказов электрооборудования в системах электроснабжения.

3. Результат исследования

В качестве примера приводится расчет нескольких потребителей промышленных предприятий. Расчеты проводились в разработанном программном комплексе. Результаты расчетов приводятся на рис. 2 и 3.

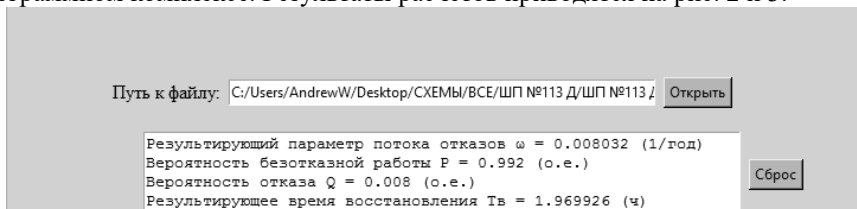


Рис. 3 – Расчеты надежности без учета технического состояния

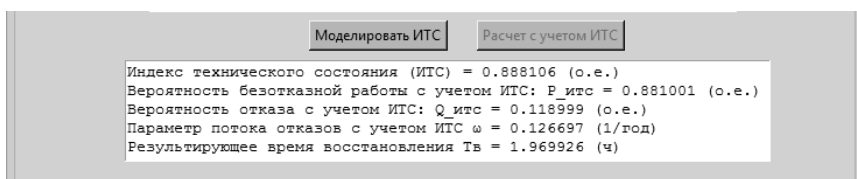


Рис. 4 – Расчеты надежности с учетом технического состояния

С учетом текущего технического состояния вероятность безотказной работы была снижена на 11,2%. Аналогичное исследование было проведено еще для 50 схем потребителей. В среднем с учетом ИТС снижение показателя P составило 12,3%.

Заключение

Была обработана статистическая информация об отказах на электрооборудовании систем электроснабжения предприятий за 10 лет эксплуатации и получены основные показатели надежности для электрооборудования.

Предложены математические модели способные учитывать текущее техническое состояние электрооборудования. Реализация моделей представлены в виде программного комплекса.

Был проведен расчет надежности для 50 схем электроснабжения промышленных предприятий. В среднем показатель безотказной работы снижается на 12,3%.

При принятии решения о выводе конкретного оборудования в плановый ремонт следует учитывать текущее состояние, оценку которого можно получить с помощью систем мониторинга.

Расчеты надежности схем электроснабжения без информации о текущем состоянии их элементов приводят к оптимистически-завышенным результатам.

Список литературы

- [4] Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Высш. шк., 2001.
- [1] Об утверждении Методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей // приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676, URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722/> (дата обращения: 17.04.2024).
- [3] Свидетельство № RU 2022618655. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода / Ю.А. Секретарев, А.А. Горшунов // зарегистр. 13.05.2022. 1 с.
- [2] Секретарев Ю. А., Горшунов А. А. Моделирование технического состояния электрооборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания // Известия Транссиба. – 2023. – № 3 (55).

THE USE OF A SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING THE TECHNICAL CONDITION AND AUTOMATED CALCULATION OF THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

A.A. Gorshunov (*98sever@mail.ru*)

Y.A. Sekretarev (*sekretarev@corp.nstu.ru*)

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

The paper considers the use of the Monte Carlo method for modeling the technical condition of electrical equipment of power supply systems. The created mathematical model takes into account the appearance of defects during the operation of electrical equipment. The algorithm is implemented in the form of a software package for automated calculation of the structural reliability of power supply systems, taking into account the current technical condition of electrical equipment. For example, the reliability of existing power supply schemes is calculated based on statistical information about failures of electrical equipment.

Keywords: technical condition index, simulation of technical condition monitoring, power supply systems, automated calculation.

УДК: 621.3.051

ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ЛЭП

Н.С. Компанийцев (*noname.justrock@gmail.com*)
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь

Данная статья анализирует преимущества и недостатки применения композитных опор в энергетике. Роль электрического оборудования в повышении качества жизни и обеспечении безопасности рабочих процессов становится все более важной. Композитные опоры для воздушных линий электропередач обладают рядом уникальных свойств, таких как прочность, низкая масса, диэлектрические свойства, упругость, долговечность, минимальное обслуживание, коррозионная стойкость и экологическая безопасность. Однако они также имеют высокую стоимость и требуют особых навыков и оборудования для монтажа. Все больше производителей исследуют и разрабатывают эту технологию, и с течением времени ожидается, что проблемы будут преодолены.

Ключевые слова: композитные опоры, композитные провода, воздушные ЛЭП, надежность электроснабжения.

Введение

Роль электрического оборудования в повышении качества жизни граждан и обеспечении безопасности рабочих процессов постепенно увеличивается. В связи с этим становится все более важным обеспечение непрерывного электроснабжения различных потребителей, включая объекты автомобильного, авиационного и трубопроводного транспорта, а также объекты связи и телекоммуникаций, часто находящиеся в сложных географических и климатических условиях. Воздушные линии электропередач с напряжением 6-10 кВ являются наиболее дорогостоящими вложениями и одновременно наиболее уязвимыми для воздействия неблагоприятных климатических факторов.

Цель данной статьи заключается в анализе преимуществ и недостатков применения композитных опор.

Перспективы применения композитных опор в энергетике

Композиционным материалом называется неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов. Он включает армирующие элементы, которые обеспечивают нужные механические характеристики, и матрицу, которая обеспечивает совместную работу армирующих элементов.

Композитные опоры для воздушных линий электропередач являются относительно новым типом мачтовых конструкций, применение которых началось около 15 лет назад. Опыт их использования пока еще невелик, но современные композитные материалы придают опорам этого типа ряд уникальных свойств, которые представляют интерес с точки зрения снижения затрат на монтаж и повышения эксплуатационной надежности воздушных линий электропередач. На рисунке 1 приведен график применения композитных материалов в мире.

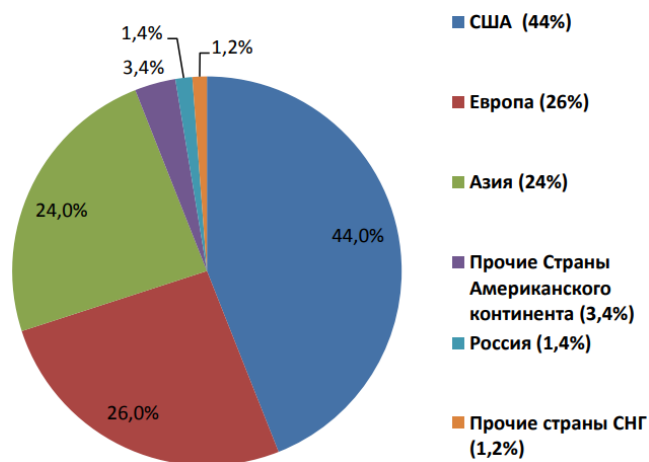


Рис. 1. Интегральная структура мирового потребления композитных пластиков

Промежуточные одностоечные композитные опоры применяются на воздушных линиях электропередач с напряжением 220, 110, 35 и 10 кВ, с переменным током частотой до 100 Гц, как одноцепные, так и двухцепные. Для подвески проводов на опорах 220 и 110 кВ используются изолирующие траверсы.

Композитные опоры ЛЭП являются важными конструктивными элементами линий электропередач, отвечающими за крепление и подвеску электрических проводов, включая грозотросы и оптоволоконные провода на определенном уровне.

Производители композитных опор выделяют следующие основные преимущества:

Прочность - композитные опоры обладают сравнимой прочностью с опорами из стали.

Масса - низкая масса облегчает транспортировку и установку опоры.

Диэлектрические свойства - композитные опоры имеют практически аналогичные изоляционные характеристики, как у деревянных опор. Их изоляционные свойства позволяют применять новые методы защиты линий от грозových перенапряжений, основанные на повышении электрической прочности фазной изоляции.

Упругость - благодаря эластичности и гибкости, композитные опоры способны выдерживать большие ветровые и гололедные нагрузки. Их высокая эластичность позволяет избежать остаточной деформации.

Долговечность - испытания показали, что срок службы композитных опор составляет около 70-80 лет.

Минимальное обслуживание - стабильность материала позволяет использовать композитные опоры в суровых климатических условиях с минимальными затратами на обслуживание.

Физические свойства - композитные опоры не подвержены гниению и коррозии, не подвержены воздействию птиц и насекомых, обладают высокой огнестойкостью и могут быть сделаны абсолютно негорючими с использованием огнестойких покрытий.

Экологическая безопасность - при производстве композитных опор не используются токсичные компоненты, и они не выделяют вредные вещества в окружающую среду во время эксплуатации. Использование композитных опор не приводит к загрязнению окружающей среды и не вызывает проблем, связанных с деревянными опорами, обработанными креозотом.

Безопасность дорожного движения - опоры из композитных материалов обладают большей ударобезопасностью по сравнению с железобетонными и металлическими аналогами. Они не причиняют травм участникам дорожного движения и серьезных повреждений транспортным средствам при ДТП.

Эстетический аспект - металлические и железобетонные опоры портят естественный ландшафт или не гармонируют с городской застройкой, в то время как композитные опоры могут быть окрашены в любой цвет и превращены в произведения искусства.

Также к неочевидным достоинствам таких опор можно выделить:

- Высокая степень заводской готовности к монтажу в полевых условиях;
- Модули быстро доставляются в необходимой комплектации на стройплощадку, без длинномерного транспорта;
- Опоры из композитных материалов, учитывая их весовые характеристики, могут быть перенесены и смонтированы практически вручную в труднодоступных местах прохождения ВЛ, что делает их незаменимыми при аварийно-восстановительных работах;

- Устойчивость к повышенным механическим нагрузкам. Они не ломаются и не падают, а просто пружинят, что на порядок повышает надежность работы ВЛ в условиях гололедообразования и сверхрасчетных ветровых нагрузок и снижает риск каскадного развития аварии;
- Меньшие эксплуатационные затраты. Стоимость опор компенсируется низкими затратами на обслуживание;
- Использование композитных траверс позволяет уменьшить горизонтальные габариты применяемых стоек и увеличить длину пролетов.

Однако упомянутые типы опор имеют свои недостатки.

Прежде всего, это связано с высокой стоимостью композитных опор, так как в нашей стране процесс производства опор из композитных материалов еще не развит. Однако, если учесть общую стоимость владения такими опорами, учитывая их долгий срок службы и меньшие затраты на установку и обслуживание, разница оказывается не такой значительной, как предполагалось.

Из-за высокой стоимости применение композитных опор оправдано только на линиях, которые проходят через труднодоступные местности, такие как горы, тундра, тайга или болота, или при строительстве высоконадежных линий, где обслуживание затруднено.

Одна из особенностей конструкций на основе композитных материалов – их высокая эластичность, однако для высоких опор данная особенность может быть расценена как негативная.

Последним, менее значимым недостатком, который может быть преодолен при правильном управлении персоналом, является недостаток опыта в монтаже и эксплуатации данного типа опор, но со временем эта проблема будет устранена.

Ниже приведены основные факторы, которые определяют географию применения композитных опор в настоящее время:

- Труднодоступные места, где доставка, монтаж и обслуживание имеют высокую стоимость.
- Характеристики эксплуатационных условий, такие как агрессивная атмосфера, особые типы грунтов и солевые туманы.
- Частые экстремальные погодные условия, такие как сильные снегопады и ураганы, которые требуют повышенной надежности.
- Области, где надежность является ключевым фактором при выборе опор для электрических линий.

Экономический эффект от внедрения композитных материалов при строительстве опор ВЛ

Эффективность применения определенного типа опор зависит от различных факторов, таких как климатические условия в регионе, особенности технического задания на объект строительства, доступность

производства определенного типа опор и другие факторы. В связи с разнообразием условий строительства, рекомендуется предварительно оценить область эффективного использования конкретных типов опор. Это позволит избежать ненужных затрат при строительстве линий электропередачи и ускорить достижение экономических результатов от реализации проектов.

Выбор разумных организационно-технических решений в строительстве осуществляется с учетом экономического эффекта. В практике это может иметь как положительные, так и отрицательные последствия.

Экономия на постоянных расходах, достигаемая за счет сокращения сроков строительства благодаря технологическим усовершенствованиям, организации и управлению, называется "эффектом подрядчика". Уменьшение времени выполнения работ позволяет снизить накладные расходы строительной организации.

В таблице 1 и 2 представлены капитальные затраты предоставленные федеральным испытательным центром ПАО «Россети».

Табл. 1. Капитальные затраты на строительство линии 6-10 кВ

Показатели		Одноцепная промежуточная опора 6-10 кВ			
		Композит	Деревянная	ЖБ	Металл
		ФБСА611.00.000-01	П10-3д	П10 миЗ	Многогранная СМ10 П
Масса стойки опоры (при модули упругости, 35 ГПа)	кг	157,45	210	1 125	369
Объем стойки	м ³ .	0,085	0,42	0,45	0,041
Стоимость стойки опоры	Руб.	29 443	4 819	10 325	42 000-65 000
Стоимость доставки с приобъектного склада в текущих ценах	Руб./км	1 411	2 079	16 188	28 070

Габаритный пролет	м	81	60	85	75
Кол-во опор на 1 км	Шт.	12	17	12	13
Итого	Руб./км	359 127	86 618	154 488	549 209 – 848 209

Табл. 2. Капитальные затраты на строительство линии 35 кВ

Показатели		Одноцепная промежуточная опора 35 кВ			
		На композитных опорах*	На решетчатых опорах	На метал. опорах из гнутого профиля	На ЖБ опорах
		КО1-35	П35-1	ПС35ПИ-1М	-
Масса стойки опоры (при модули упругости, 35 ГПа)	кг	1 375	1 558	1 546	4 834
Объем стойки	м ³	-	-	-	-
Стоимость стойки опоры	Руб.	257 125	102 828	185 500**	63 569
Стоимость фундамента	Руб.		17 700	200000	
Габаритный пролет	м	280	280	263	250
Кол-во опор на 1 км	Шт.	3,57	3,57	3,8	4,0

Стоимость монтажа в текущих ценах	Руб ./км	20 675	125 895	23 247	20 000
Итого	Руб ./км	991 746	879 730	1 553 238	334 276

По результату технико-экономического анализа капитальных затрат для различных видов опоры ЛЭП, можно сделать выводы, что при строительстве линий электропередач напряжением 6-10 кВ и 20 кВ рекомендуется использование композитных материалов для быстромонтируемых ремонтных опор аварийного резерва. Это позволит определить особенности проектирования и эксплуатации композитных опор, а также оценить перспективы их применения при строительстве новых линий. Реконструкция распределительных сетей с заменой деревянных опор на композитные также является целесообразной, при условии оценки экономической эффективности и оценки экономического эффекта.

При использовании композитных материалов для опор линий электропередач 35 кВ, необходимо уточнить электрические параметры опоры, которые влияют на грозозащиту и работу изоляции. Это связано с тем, что композитные опоры выполняют функции не только как строительные конструкции, но и как электротехнические элементы сети, которые подвергаются воздействию токов нормальных и аварийных режимов, а также электрических и магнитных полей.

Таким образом, использование композитных материалов для опор линий электропередач имеет потенциал для улучшения эффективности строительства и эксплуатации, особенно для линий высокого напряжения. Однако, необходимо проводить дополнительные исследования и оценки, чтобы более точно определить преимущества и ограничения применения композитных опор в различных условиях эксплуатации.

Вывод

В данной статье были рассмотрены преимущества и перспективы применения композитных опор в энергетике. Композитные опоры представляют собой относительно новый тип мачтовых конструкций, обладающих рядом уникальных свойств, таких как прочность, низкая масса, долговечность, устойчивость к коррозии и диэлектрическая невосприимчивость. Они могут быть эффективно применены в труднодоступных местах с высокой стоимостью доставки и обслуживания, а также в условиях агрессивной атмосферы и экстремальных погодных условий.

Однако, несмотря на все их преимущества, композитные опоры имеют высокую стоимость, которая с течением времени может быть снижена

благодаря совершенствованию технологий и росту стоимости металлов. Они также требуют разработки соответствующей нормативно-технической документации для обеспечения правильного проектирования и строительства линий электропередач с их использованием.

В целом, применение композитных опор в энергетике представляет перспективное направление, которое может способствовать повышению надежности и эффективности электроснабжения, особенно в условиях с особыми географическими и климатическими условиями. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к расширению применения композитных опор и улучшению их экономической эффективности.

Список литературы

- [1] Ященков, А.С., Козлов, А.Н. Использование композитных материалов в современной энергетике. Достоинства и недостатки // Вестник АмГУ. 2016. – Выпуск 73.
- [2] Идиятуллин, А.А. Перспективы применения опор линий электропередач 110 кВ из композитных материалов // «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» 7(58), 2021.
- [3] Новиков, С.Л. Опыт применения современных типов опор в распределительных сетях ПАО «МРСК центра» и ПАО «МРСК центра и приволжья» // VI международной научно-практической конференции «Опоры и фундаменты для вл: технологии проектирования и строительства» сессия № 35 в рамках Международного Форума «Электрические сети», 2019.
- [4] Дёмин, А.В. Перспективы применения опор из композитных материалов для строительства ВЛ напряжением 0,4 кВ и 6-20 кВ // Опоры и фундаменты для умных сетей: инновации в проектировании и строительстве, 2016.
- [5] Бочаров, Ю.Н., Жук, В.В. К вопросу о композитных опорах воздушных линий // Труды Кольского научного центра РАН. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2013. – Т. 4, вып. 1.

PROSPECTS FOR THE USE OF COMPOSITE MATERIALS IN THE ENERGY SECTOR ON THE EXAMPLE OF POWER TRANSMISSION POLES

N.S. Kompanytsev (*noname.justrock@gmail.com*)
Sevastopol State University, Sevastopol

This article analyzes the advantages and disadvantages of using composite supports in the energy sector. The role of electrical equipment in improving the quality of life and ensuring the safety of work processes is becoming increasingly important. Composite supports for overhead power

lines have a number of unique properties such as strength, low weight, dielectric properties, elasticity, durability, minimal maintenance, corrosion resistance and environmental safety. However, they also have a high cost and require special skills and equipment for installation. More and more manufacturers are researching and developing this technology, and over time it is expected that the problems will be overcome.

Keywords: composite supports, composite wires, overhead power lines, reliability of power supply.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЕ ДУГИ ЗАМЫКАНИЯ МЕЖДУ НЕИЗОЛИРОВАННЫМИ ПРОВОДАМИ ВЛ

В.А. Дружин (*vlad.druzhin2014@yandex.ru*)
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», Севастополь

Г.С. Скакун (*skakun2000@yandex.ru*)
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», Севастополь

В статье рассмотрен эксперимент, в ходе которого, определена скорость движения дуги по не изолированным проводам. Представлены зависимости скорости и расстояния от времени.

Ключевые слова: дуга короткого замыкания, межфазное короткое замыкание

Введение

Заметная часть отказов в сетях электроснабжения среднего напряжения связана с авариями на воздушных линиях электропередач (ВЛ). Дуга замыкания – это электрический разряд, возникающий между двумя неизолированными проводниками при превышении напряжением определенного критического значения. Пока дуга перемещается вдоль проводов, она не наносит существенных повреждений проводам линии. Но если дуга успеет «добежать» до опоры, она может привязаться к изолятору и повредить его. Поэтому важно понимать, на какое расстояние перемещается дуга вдоль проводов за заданное время.

Описание установки

Для определения скорости движения дуги проводился эксперимент на установке, представленной на рисунке 1. Установка предназначена для инициирования дуги короткого замыкания между с заданной силой тока между образцами проводов. В рассмотренном эксперименте максимальное значение тока замыкания составляло 1,2 кА, длительность тока - 30 мс.



Рис. 1 Фотография установки. Компоненты установки: 1) Весы крановые электронные; 2) Серьга CPC 7-16; 3) Изолятор ПС-70; 4) Ушко У1-7-16; 5) Анкерные зажимы PAZ-3; 6) Место установки проволоки для обеспечения замыкания; 7) Исследуемые образцы (пара); 8) Талрепы; 9) Рама установки.

Описание модели

Для расчета скорости движения дуги на основе экспериментальных данных была создан алгоритм в программе MATLAB. В качестве входных данных алгоритм использует видеозапись эксперимента на установке, описанной выше.

Записанное видео загружается в программу, после чего в графическом интерфейсе пользователю необходимо с помощью появившегося перекрестья указывать середину вспышки на каждом кадре видеозаписи.

Результатом данного алгоритма является скорость движения дуги. Зная величину скорости, далее можно рассчитать расстояние, пройденное за среднее время отключения тока КЗ релейной защитой.

Описание результатов

В программе MATLAB по значениям выходных параметров формируется графическое отображение результатов расчета. На рисунке 2 приведён характерный график.

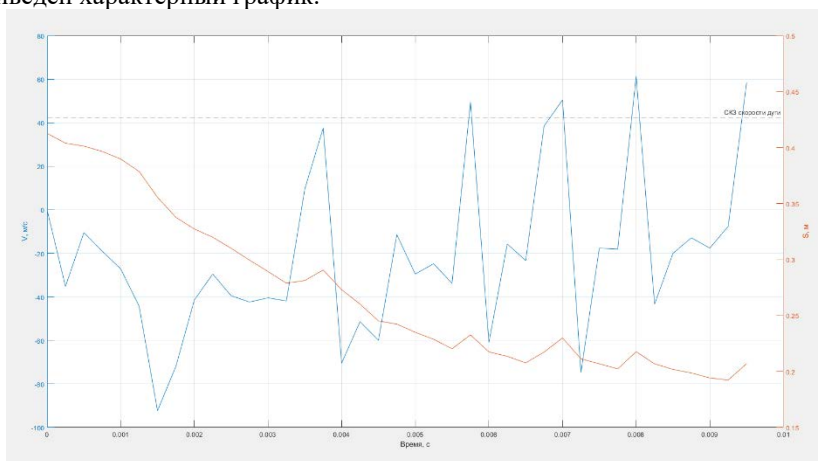


Рис. 2 – График зависимости скорости дуги и пройденного пути от времени. Отсчет времени ведется от момента короткого замыкания

График демонстрирует характеристики дуги, которые позволяют определить, успеет ли дуга достичь соседней опоры. По оси абсцисс откладывается время, измеряемое в секундах. По оси ординат слева, (обозначена голубым цветом) откладывается величина скорости дуги, измеряемая в метрах в секунду, её график показан тем же цветом. По оси ординат справа (обозначена оранжевым цветом), откладывается величина расстояния, пройденная той же дугой в метрах; её график, также, показан оранжевым цветом. Пунктирной линией показана средняя скорость движения дуги короткого замыкания.

Из графика видно, что средняя скорость дуги составляет примерно 41 метр в секунду, а максимальное пройденное расстояние дугой – 0,47 метра.

Заключение

Проведенный эксперимент позволил определить скорость дуги, возникающей при коротком замыкании, параметры которого характерны

для ВЛ 10 кВ. Полученные результаты могут быть полезны для обеспечения надежного функционирования ВЛ путем подбора корректного времени отключения.

Список литературы

- [1] О.Б.Брон Движение электрической дуги в магнитном поле // Электричество. — 1966. — № 7. — С. 1-6.
- [2] Определение вида междуфазного короткого замыкания в токовых защитах линий 6–35 кВ // Энергетика. Изв. высш. учеб. Заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60. № 1. С. 5–15. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-5-15.
- [3] О. В. Полухин Автоматизированный метод исследования пережигающего действия дугового короткого замыкания // Ползуновский вестник. — 2012. — № 4. — С. 116-120.

INVESTIGATION OF THE MOVEMENT OF THE SHORT CIRCUIT ARC BETWEEN NON-INSULATED OVERHEAD

V.A. Druzhin (*vlad.druzhin2014@yandex.ru*)
Sevastopol State University, Sevastopol

G.S. Skakun (*skakun2000@yandex.ru*)
Sevastopol State University, Sevastopol

The article considers a program that determines the speed of arc movement along non-insulated wires. Graphs of speed and distance from time are also presented. The installation is considered, with which you can record a video for further research

Keywords: short circuit arc, interfacial short circuit

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЕАЛЮМИНЕВОГО ПРОВОДА ПОВРЕЖДЁННОГО МЕЖФАЗЫМ ЗАМЫКАНИЕМ

В. С. Павлова (*vikki19pavlova@gmail.com*)
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», Севастополь

Сталеалюминовые провода широко используются в электрических сетях для передачи электроэнергии, они обладают положительными сторонами из-за своей высокой прочности, низкого веса и хорошей проводимости. Однако, как и любой другой объект, данный вид используемого оборудования, подвержен различным повреждениям в процессе эксплуатации, которые вызывают снижения эффективности и риск перегрузки оборудования. Межфазное замыкание может привести к серьезным повреждениям проводов, включая сталеалюминовые провода. Нарушение изоляции и нагрев провода в результате замыкания может существенно повлиять на его механическую прочность. Исследование, является важным для обеспечения безопасности электрических сетей.

Ключевые слова: характеристики сталеалюминового провода межфазное замыкание последствия замыканий процессы деформации.

Введение

Основной целью данного исследования является - оценить механическую прочность сталеалюминового провода, повреждённого межфазным замыканием. Для достижения этой цели необходимо выявить характер и степень повреждений провода, а также сравнить его прочностные характеристики с неповреждёнными образцами.

Объектом исследования, является изучение механизмов возникновения межфазного замыкания и его последствий для провода, а так же анализ структурных изменений в проводе вызванных повреждением. Исследование проводится с целью улучшения надёжности электрических сетей, разработки новых технологий для предотвращения повреждений и повышения общей эффективности систем. В связи с этим эта тема является актуальной в области энергетики.

Неповреждённый образец провода

Сталеалюминевый провод состоит из двух компонентов: стального сердечника и алюминиевой оболочки. Стальной сердечник отвечает за механическую прочность провода в то время, как алюминиевая оболочка обеспечивает проводимость электрического тока. Эта комбинация материалов позволяет создавать легкие, но прочные провода, которые могут выдерживать значительные механические нагрузки.

Структура сталеалюминиевого провода так же играет роль в его прочностных характеристиках. Провода могут иметь различное количество жил, толщину и способ скручивания, что влияет на их устойчивость к растяжению, изгибу и другим нагрузкам. В исследовании использован провод АС-35.

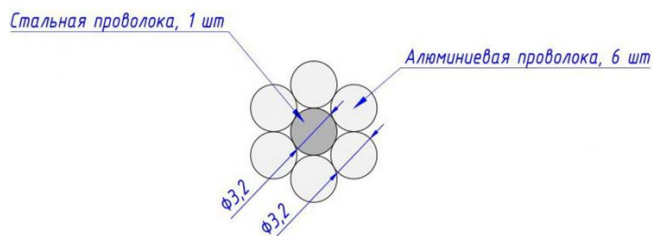


Рис. 1. Расположение и геометрический размер проволоки в проводе АС-35



Рис. 2. Образец провода, участвовавший в эксперименте

Экспериментальная установка по межфазному замыканию

Для оценки влияния межфазного замыкания на механическую прочность сталеалюминиевого провода были проведены лабораторные испытания. В лаборатории была собрана установка, по замыканию

проводов. Образцы проводов подвергались воздействию электрической дуги, имитирующей межфазное замыкание, с последующим анализом их механических характеристик.

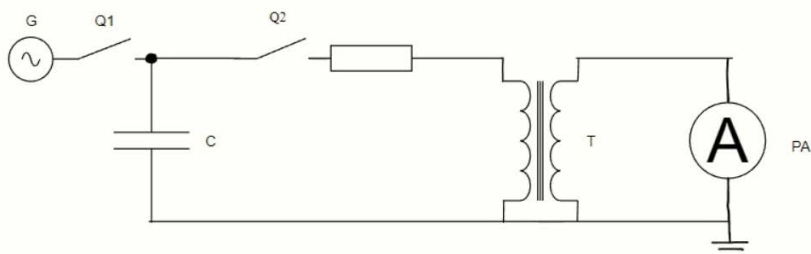


Рис. 3. Схема замещения установки замыкания проводов

Схема на рисунке включает в себя следующие компоненты:

- G – Генератор. Компонент для зарядки АКБ батареи.
- Q1, Q2 – Разъединяющий ключ. Ключ разомкнут при проведении испытания.
- C – Конденсатор. Устройство, которое может накапливать емкость и отдавать весь накопительный заряд.
- T – Трансформатор. Элемент колебательного контура, который задаёт частоту.
- РА – Амперметр. Используется для измерения протекающего тока через нагрузку.

Эксперимент включал в себя порядок действий: к установке подключается крестообразно пара промаркированных образцов, проводится замыкание первого ключа, для зарядки батареи конденсаторов затем происходит размыкание ключа. Следующий этап — это замыкание ключа номер два, тем самым передаваемы ток идёт на колебательный контур, образуя дугу в месте сближения образцов провода. Производится замыкание. Трансформатор в данной системе обеспечивает регулирование частоты в сети. Значения для снятия протекания тока передаются на амперметр. В конце эксперимента, ключ 2 размыкается.

Результаты анализа последствий межфазного замыкания

Межфазное замыкание оказывает значительное негативное влияние на механические характеристики сталеалюминиевого провода. Воздействие высоких температур электрической дуги приводит к структурным изменениям в металлических компонентах провода, что и вызывает снижение общей механической прочности.



Рис. 4. Последствие межфазного замыкания

1.1. Анализ повреждений при растяжении

Первоначально проводится испытание на растяжение, чтобы определить предельное напряжение, при котором провод обрывается. Для этого выбираются образцы поврежденного провода, которые затем подвергаются постепенному увеличению нагрузки до точки разрыва. На начальных этапах растяжения в проводе наблюдаются локальные деформации, выражающиеся в вытягивании и утончении материала. Это приводит к микротрещинам в поверхностных слоях, а также к разрыву отдельных проволок. По мере увеличения нагрузки микротрещины начинают распространяться, постепенно переходя в магистральные трещины. Разрыв все большего числа проволок приводит к общему снижению несущей способности провода. При достижении критического уровня растягивающих напряжений происходит полный разрыв провода. Характер разрушения - преимущественно хрупкий, с формированием ровной поверхности излома без признаков пластической деформации.

1.2. Анализ повреждений при изгибе

Далее проводится испытание на изгиб, чтобы определить способность провода сохранять свою структурную целостность при изгибе различной степени. Образцы провода подвергаются постоянной флексии с различным радиусом изгиба, а также варьирующейся амплитудой нагрузки. Исследуется поведение провода при изгибе, его способность к упругому возврату и возможные изменения в его структуре и свойствах. Под воздействием изгибающей нагрузки в проводе возникает неравномерное распределение напряжений. Растягивающие напряжения на выпуклой стороне приводят к образованию микротрещин, а сжимающие напряжения на вогнутой стороне вызывают местные деформации материала. При многократных циклах изгиба микротрещины на растянутой стороне провода постепенно увеличиваются в размерах и глубине, ослабляя сечение провода. Одновременно происходит расслоение проволок в местах локальных сжатий. В результате дальнейшего развития повреждений

провод теряет свою целостность. Разрыв отдельных проволок приводит к резкому снижению прочности, и в конечном итоге, к полному разрушению провода под действием изгибающих нагрузок.

Заключение

Проведенные испытания позволяют сделать вывод, что межфазное замыкание оказывает существенное негативное воздействие на механическую прочность сталеалюминиевого провода. Наблюдается значительное снижение предела прочности, удлинения при разрыве и энергии разрушения повреждённых образцов по сравнению с исходными. Эти изменения механических свойств могут привести к разрыву провода и выхода из строя линии электропередачи. Полученные результаты указывают на необходимость принятия мер по предотвращению и своевременному выявлению межфазных замыканий для обеспечения надежной и безопасной работы электрических систем.

Список литературы

- [1] Беляев Л. С. Причины и механизмы повреждений проводов // Технические науки энергетики. 2021. №2 — с. 52-55
- [2] Прохоров А. Е., Плеханов О. А. Экспериментальное исследование процесса разрушения стали // Международный журнал символ науки 2019. №4. с 125-132.
- [3] Фёдоров С. К., Иванова Ю. С. Повышение износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой // Инженерные технические вопросы и решения. 2019. №11. с. 90-103

STUDY OF MECHANICAL STRENGTH OF STEEL-ALUMINUM WIRE DAMAGED BY INTERPHASE CLOSURE

V. S. Pavlova (*vikki19pavlova@gmail.com*)
Sevastopol State University, Sevastopol

Aluminum steel wires are widely used in electrical networks for the transmission of electricity, they have positive sides due to their high strength, low weight and good conductivity. However, like any other object, this type of equipment used is subject to various damages during operation, which cause a decrease in efficiency and the risk of overloading the equipment. An interfacial short circuit can cause serious damage to wires, including aluminum steel wires. Insulation failure and heating of the wire as

a result of a short circuit can significantly affect its mechanical strength. Research is important to ensure the safety of electrical networks.

Keywords: characteristics of the steel-aluminum wire interfacial closure the consequences of closures sagging deformation

АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

В.А. Воронин (*voroninva@kuzstu.ru*)

Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово

Настоящая работа посвящена анализу открытых данных об использовании электротранспорта для формирования модели поведения владельцев электромобилей. В работе описано текущее состояние развития рынка электромобилей в России, сформулированы основные проблемы развития электротранспортной инфраструктуры. Представлен анализ открытых датасетов об использовании быстрых зарядных станций, включающие данные о более 50 тыс. зарядных сессиях на более 100 зарядных портах. Выполнено описание характера использования зарядных станций по часам суток, продолжительности зарядных сессий, начального и конечного уровня заряда электромобилей. Полученные результаты могут быть использованы для верификации имитационных моделей электротранспортных станций быстрого типа.

Ключевые слова: электромобиль, электротранспортная инфраструктура, быстрые зарядные станции, статистическая обработка

Введение

По данным информационного-аналитического агентства Автостат, по состоянию на начало 2024 года парк электромобилей России превысил отметку в 39 тыс., что составляет порядка 0,1% от общего количества легковых автомобилей.

По различным оценкам к 2030 году количество электромобилей в России может варьироваться от 540 тыс. до более 3 млн. Так, согласно прогнозу концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в РФ на период до 2030 года количество электромобилей в России в 2030 году может составить от 540 тыс. до 3,23 млн. шт., что соответствует доле в общем парке легковых автомобилей 1,16%-6,97% при доле в годовом объеме продаж в 11,5-91,5% (по оценке авторов). Группа компаний B1 прогнозирует, что в 2030 году доля электромобилей в годовых продажах составит порядка 12% (220 тыс.

шт.), а к 2035 году – 25% (483 тыс. шт.). По оценкам аналитиков Центра экономического прогнозирования ГПБ к 2030 году парк электромобилей достигнет 660 тыс. шт.

По данным сервиса 2chargers по состоянию на середину 2023 года на территории России действует 4324 ЭЗС в пропорции примерно 30 % быстрых и 70 % медленных ЭЗС. В 2024 году планируется ввести в эксплуатацию еще 4643 ЭЗС (1437 быстрых и 3206 медленных ЭЗС), т.е. ожидается двукратное увеличение существующей электрозарядной инфраструктуры (по данным Автостат).

В данных условиях высокую важность имеет рациональное планирование развития электрозарядной инфраструктуры, обеспечивающее соблюдение интересов всех участников данного процесса: владельцев электромобилей; владельцев ЭЗС и провайдеров услуг заряда; сетевых организаций.

Постановка проблемы

В настоящее время развитие электрозарядной инфраструктуры электротранспорта сталкивается с рядом затруднений:

Высокие затраты на технологическое присоединение быстрых ЭЗС к электрическим сетям.

Низкий коэффициент использования быстрых ЭЗС.

Первая проблема обусловлена высокой мощностью быстрых ЭЗС и недостатком свободной трансформаторной мощности ближайших трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ для технологического присоединения ЭЗС. Особенно остро данная проблема может стоять при строительстве ЭЗС на междугородних трассах в большом удалении от существующих центров питания.

Вторая проблема обусловлена малым количеством электромобилей, приходящихся на ЭЗС, что является причиной низкого коэффициента использования ЭЗС. Это может быть связано как с опережающими темпами развития электрозарядной инфраструктуры, так и с высокой долей домашнего заряда. По результатам опроса владельцев электромобилей, проведенного Автостат, только 28% зарядных сессий проходят вне дома, что может являться причиной недоиспользования общественных ЭЗС. Также важным фактором является преобладание в парке электромобилей России относительно старых моделей, максимальная зарядная мощность которых ограничена, что не позволяет в полной мере реализовать потенциал быстрых ЭЗС и обуславливает низкий коэффициент использования установленной мощности даже при большом количестве зарядных сессий. По данным Автостат, самой распространенной моделью электромобиля в России по-прежнему является Nissan Leaf (около 38% парка), максимальная мощность быстрого заряда которого ограничена величиной в 46 кВт.

Малый коэффициент использования обуславливает недостаточную рентабельность строительства быстрых ЭЭС. По оценкам европейского провайдера зарядной инфраструктуры Virta средний коэффициент использования в пяти странах Европы составляет всего 9,4% для медленных ЭЭС и 5,9% для быстрых ЭЭС. В статье консалтинговой компании McKinsey&Company отмечается, что средний коэффициент использования быстрых ЭЭС в США за 2022 год составил всего 7,5%, в этой же работе авторы оценивают коэффициенты использования для достижения рентабельности быстрых ЭЭС в 15-20%. По оценкам консалтинговой компании PwC коэффициент использования быстрых ЭЭС также должен находиться в диапазоне 10-20% для достижения точки безубыточности.

Таким образом для рационального планирования развития электроразрядной инфраструктуры, обеспечивающего приемлемые экономические показатели работы быстрых ЭЭС, необходимо исследование факторов и закономерностей, определяющих использование ЭЭС владельцами ЭТ. С этой целью в настоящей работе выполнен анализ существующих исследований и открытых данных по использованию быстрых ЭЭС в разных странах мира.

Методология

Описание исследуемых данных об использовании быстрых ЭЭС приведено в табл. 1. Открытые датасеты (п.1-3, табл. 1) представлены в табличном формате (файлы csv) и содержат данные о зарядных сессиях. Для каждой зарядной сессии указаны дата и время начала и окончания сессии, идентификатор ЭЭС, тип ЭЭС, место расположения ЭЭС (только в датасете №1), объем электропотребления, начальный и конечный уровень заряда батареи ЭТ (только в датасете №2), а также иные данные, анализ которых не рассмотрен в настоящей работе.

Анализ выполнен на языке программирования python с использованием библиотек pandas для работы с табличными данными, scipy для определения параметров статистических распределений, а также matplotlib и seaborn для визуализации данных.

Результаты

Статистические характеристики основных показателей использования быстрых ЭЭС представлены в табл. 2-5 и на рис. 1-4.

Табл. 1. Данные об использовании быстрых ЭЭС

№	Название	Количество портов ЭЭС, шт.	Количество сессий, шт.	Мощность ЭЭС, кВт	Период времени

1	A dataset for multi-faceted analysis of electric vehicle charging transactions (Корея) [Baek et al., 2024]	990	14 953	нет данных	30.09.2021 – 30.09.2022
2	Level 3 electric vehicle charging dataset (Швейцария)	2	1 878	172,5	12.04.2022 – 05.07.2023
3	Modelling charge profiles of electric vehicles based on charges data (Испания) [Andrenacci et al., 2022]	30	34 866	44	31.12.2018 – 31.12.2019
4	Electric Vehicle User Behavior: An Analysis of Charging Station Utilization in Canada (Канада) [Jonas, 2023]	59	51 078	нет данных	2018 - 2019
5	Data mining of plug-in electric vehicles charging behavior using supply-side data (США) [Siddique et al., 2022]	821 (с учетом медленных ЭЭС)	421	50	07.2017 – 08.2018
6	EV WATTS Data Dashboard (США)	5 308	2 807 388	нет данных	10.2019 – 12.2023

Табл. 2. Уровень заряда батареи ЭТ в начале заряда

Параметр	Датасет №2	Датасет №4
Среднее	33,67	33,97
Стандартное отклонение	19,15	19,04
Минимум	0	0
Q25	19	19
Медиана	31	31
Q75	46	47
Максимум	98	100

Табл. 3. Уровень заряда батареи ЭТ в конце заряда

Параметр	Датасет №2	Датасет №4
Среднее	79,14	73,38
Стандартное отклонение	18,40	18,45
Минимум	12	0
Q25	70	63
Медиана	83	80
Q75	93	86
Максимум	100	100

Табл. 4. Длительность заряда ЭТ

Параметр	Датасет №1	Датасет №2	Датасет №3	Датасет №4	Датасет №6
Среднее	36,73	32,66	28,98	25,75	54
Стандартное отклонение	24,32	17,09	19,98	19,21	-
Минимум	3	5	5	3	-
Q25	23	20	18	12,72	-
Медиана	37	30	26	20,45	-
Q75	40	42	35	32,17	-
Максимум	505	144	1306	229,75	-

Табл. 5. Количество зарядных сессий в день на 1 порт ЭЭС

Параметр	Датасет №1	Датасет №2	Датасет №3	Датасет №4	Датасет №6
Среднее	0,041	2,091	3,175	1,644	0,23
Стандартное отклонение	0,224	2,667	3,166	2,085	-
Минимум	0	0	0	0,008	-
Q25	0	0	1	0,461	-
Медиана	0	0	2	1,000	-
Q75	0	4	5	1,745	-
Максимум	5	14	26	9,606	-

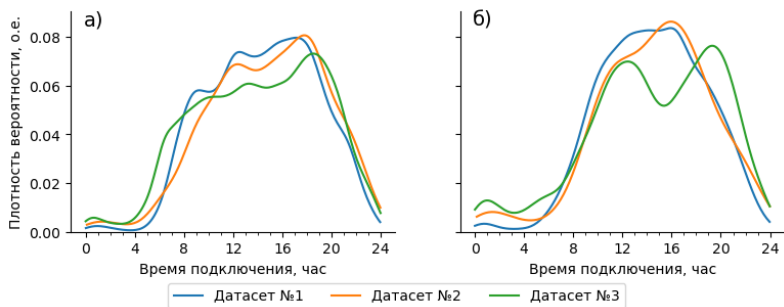


Рис. 1. Эмпирические распределения постановки ЭТ на заряд в течение суток для рабочих (а) и выходных дней (б)

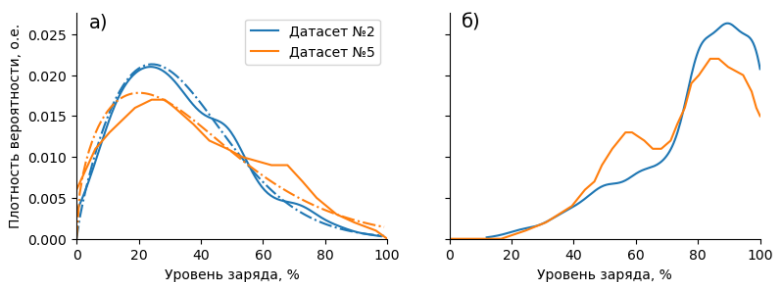


Рис. 2. Эмпирические (сплошная линия) и теоретические (штрихпунктирная линия) распределения начального (а) и конечного (б) уровня заряда ЭТ

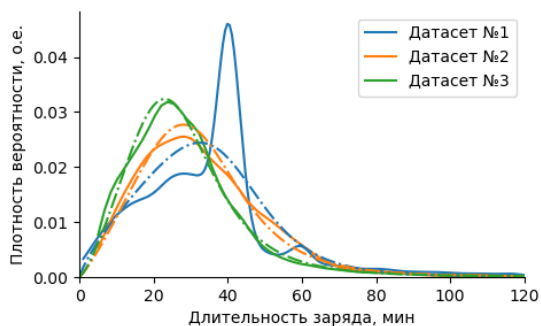


Рис. 3. Эмпирические (сплошная линия) и теоретические (штрихпунктирная линия) распределения длительности заряда

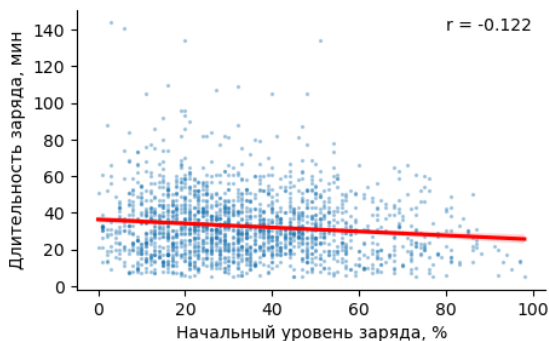


Рис. 4. Диаграмма рассеяния начального уровня и длительности заряда

Обсуждение

Как следует из рис. 1, распределение вероятности постановки ЭТ на заряд в течение суток носит схожий характер в представленных датасетах. Частоты подключения ЭТ достигают максимума в вечерний период (16-19 часов). Будние дни характеризуются более ранним началом активного использования ЭЗС (с 6-7 часов утра) по сравнению с выходными днями (с 8-9 часов утра). Для датасета №3 в выходные дни распределение носит бимодальный характер с максимума в 12 и 19 часов. Представленные результаты также соответствуют данным, приведенным в датасете №4.

Данные о начальном и конечном уровне заряда имеются только в датасетах №2, 4 и 5. На рис. 2 график плотности вероятности для датасета №5 получен путем оцифровки рисунка, представленного в работе [Siddique et al., 2022]. Распределение начального уровня заряда с достаточной степенью точности совпадает в трех рассматриваемых датасетах (средний уровень начального заряда находится на уровне 33,67-33,97 %). Конечный уровень заряда ЭТ имеет большие различия в рассматриваемых датасетах – медианы находятся примерно на уровне 80-83%, в то время, как средние значения варьируется в пределах 73-79%. Смещение распределения конечного уровня заряда ЭТ в датасете №2 в сторону больших значений, по-видимому, связано с высокой мощностью зарядных портов данных ЭЗС. Также из представленных данных следует, что достаточно большое количество владельцев ЭТ заряжают аккумулятор до 100% не смотря на рекомендации о поддержании уровня заряда батареи ЭТ в пределах 20-80 % [Kostopoulos et al., 2020]. Представленные на рис. 2 эмпирические распределения с достаточной степенью точности соответствуют распределению Вейбулла.

Средняя длительность заряда варьируется от 25,7 до 36,7 минут (рис. 3, табл. 4). Длительность заряда в значительной степени определяется местом размещения и назначением ЭЗС. Датасет №1 имеет сведения о расположении ЭЗС, что позволяет оценить влияние местоположения ЭЗС

на длительность заряда. Так, средняя продолжительность заряда в общественных зонах (34,44 мин) почти в 2 раза ниже по сравнению с ЭЗС, расположенными в жилых зонах, а также вблизи отелей и ресторанов (57,14 мин). Эмпирические распределения для датасетов №2 и 3 (рис. 3) близки к распределению Бурра. Датасет №1 имеет характерный выброс в области 40-й минуты, что может быть связано с действием системы штрафов, стимулирующей пользователей снимать ЭТ с заряда при достижении определенного уровня заряда батареи, чтобы освободить зарядный порт для нового ЭТ.

Стоит также отметить, что между начальным уровнем и длительностью заряда практически отсутствует корреляция ($r = -0,12$), согласно данным датасета №2 (рис. 4). Это может свидетельствовать о том, что длительность заряда ЭЗС в основном определяется местоположением ЭЗС и мало зависит от уровня заряда батареи ЭТ. При этом длительность подключения ЭТ к ЭЗС может оказаться больше необходимой для полного заряда, что подтверждается достаточно большим количеством наблюдений с конечным уровнем заряда в 100 % (рис. 2, б). По данным датасета №6, отношение длительности заряда к длительности подключения ЭТ составляет в среднем 57 %, варьируясь в диапазоне от 54 % (для коммерческих ЭЗС) до 91 % (для зарядных хабов).

Наиболее противоречивые сведения получены по количеству зарядных сессий. По данным датасетов №1 и 6 среднее количество зарядных сессий в сутки на 1 порт составляет всего порядка 0,08-0,23, в то время как по данным датасетов №2, 3 и 4 – 1,64-3,17. Такое существенное различие в использовании ЭЗС по-видимому связано с малыми объемами выборок в датасетах №2, 3, 4 и включением в выборку только ЭЗС с высоким коэффициентом использования для охвата большего объема зарядных сессий. Эмпирические распределения среднего количества зарядных сессий в сутки с достаточной степенью точности соответствуют распределению Пуассона.

Заключение

В настоящей работе выполнен анализ открытых данных об использовании быстрых ЭЗС в разных странах мира.

По результатам проведенного исследования установлено, что быстрые ЭЗС в основном используются в дневное время с 7-го до 21-й час при практически полном отсутствии нагрузки в ночной период. Средний уровень заряда батареи ЭТ при подключении к быстрой ЭЗС составляет порядка 33-34 %, а после окончания заряда около 80 %. Длительность зарядной сессий в среднем колеблется от 25 до 54 минут и слабо зависит от начального уровня заряда батареи ЭТ. Среднее количество зарядных сессий в сутки на 1 порт быстрой ЭЗС варьируется в широких пределах от 0,04 до 3,175, что соответствует достаточно высокой степени недоиспользования ЭЗС.

Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы при планировании развития электроразрядной инфраструктуры, а также для верификации имитационных моделей ЭЭС быстрого типа.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

Список литературы

- [1] Четверть всех электромобилей в России приходится на Москву. – URL: <https://www.autostat.ru/news/57007/> (дата обращения: 27.03.2024).
- [2] О концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года от 23 августа 2021 - docs.cntd.ru. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/608396540> (дата обращения: 11.08.2022).
- [3] Плюс электрификация четверти авторынка. – URL: <https://b1.ru/insights/news/b1-materials-in-media/andrey-tomyshhev-ksenia-baginian-b1-kommersant-8-november-2023/> (дата обращения: 27.03.2024).
- [4] Потребление электроэнергии в РФ для зарядки электромобилей к 2030г достигнет 1 млрд кВтч – BigpowerNews. – URL: <https://www.bigpowernews.ru/interview/document112350.phtml> (дата обращения: 27.03.2024).
- [5] Какова обеспеченность электромобилей зарядной инфраструктурой в России? – URL: https://www.autostat.ru/editorial_column/55092/ (дата обращения: 27.03.2024).
- [6] Россия в 2024 году увеличит темпы установки зарядок для электрокаров. – URL: <https://www.autostat.ru/news/56715/> (дата обращения: 27.03.2024).
- [7] Стало известно, где владельцы электромобилей их заряжают. – URL: <https://www.autostat.ru/infographics/56483/> (дата обращения: 30.12.2023). –
- [8] В России зарегистрировано более 39 тысяч электромобилей. – URL: <https://www.autostat.ru/news/56993/> (дата обращения: 28.03.2024).
- [9] K. Baek, E. Lee, J. Kim A dataset for multi-faceted analysis of electric vehicle charging transactions, Scientific Data, 2024, Vol. 11
- [10] C. Siddique, F. Afifah, Z. Guo, Y. Zhou Data mining of plug-in electric vehicles charging behavior using supply-side data, Energy Policy, 2022, Vol. 161
- [11] T. Jonas, N. Daniels, G. Macht Electric Vehicle User Behavior: An Analysis of Charging Station Utilization in Canada, Energies, 2023, Vol. 16, No. 4
- [12] N. Andrenacci, F. Karagulian, A. Genovese Modelling charge profiles of electric vehicles based on charges data, Open Research Europe, 2022, Vol. 1
- [13] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos, J. K. Kaldellis Real-world study for the optimal charging of electric vehicles, Energy Reports, 2020, Vol. 6
- [14] Virta. Here's how EV drivers charge their cars across Europe | Virta. – URL: <https://www.virta.global/blog/how-are-we-charging-a-deep-dive-into-the-ev-charging-station-utilization-rates> (date accessed: 16.12.2023).
- [15] Can public EV fast-charging stations be profitable in the United States? | McKinsey. – URL: <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/can-public-ev-fast-charging-stations-be-profitable-in-the-united-states> (дата обращения: 27.03.2024).

- [16] PricewaterhouseCoopers. Electric vehicles and the charging infrastructure: a new mindset? – URL: <https://www.pwc.com/us/en/industries/industrial-products/library/electric-vehicles-charging-infrastructure.html> (date accessed 27.03.2024).
- [17] DESL-EPFL/Level-3-EV-charging-dataset. – Distributed Electrical Systems Laboratory (DESL), École Polytechnique Fédérale De Lausanne (EPFL), 2024. – URL: <https://github.com/DESL-EPFL/Level-3-EV-charging-dataset> (дата обращения: 21.03.2024).
- [18] EV WATTS Data Dashboard. – URL: <https://www.energetics.com/evwatts-station-dashboard> (date accessed: 25.03.2024).

ANALYSIS OF OPEN DATA ON THE USE OF DC ELECTRIC CHARGING STATIONS FOR ELECTRIC VEHICLES

V.A. Voronin (voroninva@kuzstu.ru)

T. F. Gorbachev Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education, Kemerovo

This work is devoted to the analysis of open data on the use of DC electric charging stations (fast type) of electric vehicles to form a behavior model for electric vehicle owners. The paper describes the current state of development of the electric vehicle market in Russia, and formulates the main problems of the development of electric charging infrastructure. An analysis of open datasets on the use of fast charging station is presented, including data on more than 50 thousand charging sessions on more than 100 charging ports. The description of the nature of the use of charging stations by the hours of the day, the duration of charging sessions, the initial and final charge levels of electric vehicles is carried out. The results obtained can be used to verify simulation models of fast electric charging stations.

Keywords: electric vehicle, electric charging infrastructure, fast charging stations, statistical processing

Научное издание

Всероссийской школы молодых ученых

**ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЛАТФОРМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Севастополь, 29-30 мая 2024 г.

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Ответственный за издание

Заведующий кафедрой «Интеллектуальные сети энергоснабжения»,
СевГУ канд.тех. наук, доцент С.Ю. Петрова

Технический редактор С.Ю.Петрова
Компьютерная верстка С.Ю.Петрова, Ю.М.Кислюк

Формат 60×84/16.

Усл. печ. Листов: 15

Тираж - электронное издание

Издатель

Севастопольский государственный университет (СевГУ)

Адрес: ул. Университетская, д. 33, г. Севастополь

ISBN 978-5-6051995-4-0



9 785605 199540 >