

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ 2021

II МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
С ЭЛЕМЕНТАМИ
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ

Москва
17 – 19 ноября
2021 г.

УДК 621.3
Ф 33

Ф 33 **Фёдоровские** чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 17—19 ноября 2021 г.) / под общ. ред. Ю.В. Матюниной. — М.: Издательский дом МЭИ, 2021. — 332 с.

ISBN 978-5-383-01480-6

Публикуются материалы Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи «Фёдоровские чтения — 2021», прошедшей в Национальном исследовательском университете «МЭИ» 17—19 ноября 2021 г.

Научная тематика конференции — «Энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии». Публикации характеризуются охватом широкого круга проблем в областях электроснабжения и энергоэффективности, энергосбережения и энергосберегающих методов, рационализации систем электроснабжения предприятий и организаций, использования собственных источников энергии в системах электроснабжения, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Сборник предназначен для участников конференции и может быть полезен широкому кругу специалистов, занятых проектированием и эксплуатацией электрического хозяйства, преподавателям, научным сотрудникам, аспирантам и студентам.

УДК 621.3

Научное издание

ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ — 2021
LI Международная научно-практическая конференция
с элементами научной школы

Корректор Г.Ф. Раджабова

Подписано в печать с оригинал-макета 16.11.21. Бумага офсетная.
Печать офсетная Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 20,5

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2
Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии»,
Москва, Волгоградский пр-т, д. 45, корп. 5

ISBN 978-5-383-01480-6

© Коллектив авторов, 2021
© НИУ «МЭИ», 2021

СЕКЦИЯ 1

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, КГТУ, г. Калининград
О.Р. Кивчун, Oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. И.Канта, г. Калининград
М.С. Жукова, melikh82@mail.ru, КИЦ, г. Калининград

ГИПЕРПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РАЗВЕРТЫВАНИЕ ДАННЫХ ПО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЮ

Объект наших исследований — региональный электротехнический комплекс. Он рассматривается как ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная совокупность, которая обладает техноценнологическими свойствами потребителей электроэнергии. Целью этой системы является оптимальное управление электропотреблением. В то же время объект представляет собой подсистему регионального электроэнергетического комплекса, которая определяется как ограниченная в пространстве и времени взаимосвязанная совокупность, также обладающая техноценнологическими свойствами источников и потребителей электроэнергии и транспортно-сетевой хозяйства, а также системы материально-технического обеспечения, которая реализует в единой системе управления и обеспечения цель электроснабжения регионального электротехнического комплекса (рис. 1) [1—12].



Рис. 1. Региональный электроэнергетический комплекс

Обратимся к ранговому анализу как основному методу исследования региональных электротехнических комплексов, предполагающему применение универсальной модели техноценоза. Это метод исследования техноценозов, цель которого — их статистический анализ и оптимизация, определяющий в качестве критерия форму ранговых параметрических распределений. Сюда входят стандартные процедуры параметрического нормирования, интервального оценивания, прогнозирования, нормирования и потенширования. Более тонкий анализ рангового параметрического распределения помогает наилучшим образом повысить эффективность рангового анализа, который осуществляется в рамках следующих (так называемых «тонких») процедур: дифлекс-анализа (на этапе интервального оценивания), GZ-анализа (на этапе прогнозирования), ASR-анализа (на этапе нормирования) и ZP-анализа (на этапе потенширования) [7].

Аналитически параметрическое распределение энергопотребления представляет собой числовую функцию, полученную в результате аппроксимации ранжированных значений энергопотребления объектов техноценоза (обычно приемников или потребителей) [7].

Процессу ранжирования должны предшествовать загрузка, очистка, форматирование и верификация данных. Следовательно:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{W_k^{\text{RAW}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Verific}} \{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Rangin}} \{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n; \\ \{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n \xrightarrow{\text{Approx}} \{W_k^{\text{APP}}\}_{k=1}^n, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\{W_k^{\text{RAW}}\}_{k=1}^n$ — множество «сырых» значений электропотребления; $\{W_k^{\text{VER}}\}_{k=1}^n$ — множество верифицированных значений; $\{W_k^{\text{RAN}}\}_{k=1}^n$ — множество отранжированных значений; $\{W_k^{\text{APP}}\}_{k=1}^n$ — множество аппроксимированных значений.

Из системы (1) становится понятным, что параметр электропотребления может быть описан одновременно четырьмя множествами, а именно:

- «необработанные» данные, загруженные непосредственно с приборов измерения в базу данных;
- верифицированные данные, полученные в результате процедуры верификации, примененной к «необработанным» данным;
- отранжированные верифицированные данные;
- аппроксимированные данные, полученные в качестве ранговых проекций эмпирических верифицированных данных на аппроксимированном ранговом параметрическом распределении.

Эти множества и составляют четыре основных слоя хранилища данных энергопотребления техноценоза.

Важной структурной единицей хранилища является цифровой слой данных, который определяется как плоская структура данных (как правило, двумерный массив). В этой функции находится определяющий индекс и/или ранг (первое измерение), номер временного интервала (второе измерение), набор параметров, которые являются результатом использования программного функционала техноценоза на OLAP-кубе данных по электропотреблению. Основная горизонтальная структурная единица OLAP-куба есть цифровой слой данных техноценоза [8].

Хранилище данных техноценоза по электропотреблению включает в себя следующие основные цифровые слои данных: [RAW]; [VER]; [RAN]; [APP]; [DIF]; [PRO]; [NOR]; [LIM]; [AMC]; [AMD]; [BIF]; [MOD]. Математическое описание введенной концепции представлено ниже.

Цифровой слой данных техноценоза о параметрах энергопотребления:

$$\langle W_{kt}^{\text{OLAP}} \rangle \xrightarrow[\substack{k=1..n \\ t=1..\tau}]{p=\text{fix}} \left\langle \begin{matrix} [\text{RAW}]_{kt} & [\text{DIF}]_{kt} & [\text{IPK}]_{kt} & [\text{AMC}]_{kt} & [\text{DAM}]_{kt} \\ [\text{VER}]_{kt} & [\text{PRO}]_{kt} & [\text{IPZ}]_{kt} & [\text{AMD}]_{kt} & [\text{VRO}]_{kt} \\ [\text{RAN}]_{kt} & [\text{NOR}]_{kt} & [\text{IPE}]_{kt} & [\text{BIF}]_{kt} & [\text{VRR}]_{kt} \\ [\text{APP}]_{kt} & [\text{LIM}]_{kt} & [\text{DFU}]_{kt} & [\text{MOD}]_{kt} & [\text{VOT}]_{kt} \end{matrix} \right\rangle; \quad (2)$$

двумерный массив цифрового слоя данных по электропотреблению:

$$[W_{kt}^{\text{RAN}}] \xrightarrow[\substack{k=1..n \\ t=1..\tau}]{} \begin{pmatrix} W_{11}^{\text{RAN}} & W_{12}^{\text{RAN}} & W_{13}^{\text{RAN}} & \dots & W_{1j}^{\text{RAN}} & \dots & W_{1\tau}^{\text{RAN}} \\ W_{21}^{\text{RAN}} & W_{22}^{\text{RAN}} & W_{23}^{\text{RAN}} & \dots & W_{2j}^{\text{RAN}} & \dots & W_{2\tau}^{\text{RAN}} \\ W_{31}^{\text{RAN}} & W_{32}^{\text{RAN}} & W_{33}^{\text{RAN}} & \dots & W_{3j}^{\text{RAN}} & \dots & W_{3\tau}^{\text{RAN}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{i1}^{\text{RAN}} & W_{i2}^{\text{RAN}} & W_{i3}^{\text{RAN}} & \dots & W_{ij}^{\text{RAN}} & \dots & W_{i\tau}^{\text{RAN}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{n1}^{\text{RAN}} & W_{n2}^{\text{RAN}} & W_{n3}^{\text{RAN}} & \dots & W_{nj}^{\text{RAN}} & \dots & W_{n\tau}^{\text{RAN}} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\langle W_{kt}^{\text{OLAP}} \rangle$ — кортеж OLAP-куба данных; $[W_{kt}^{\text{RAN}}]$ — двумерная матрица цифрового слоя ранжированных данных по электропотреблению (в выражении в качестве примера приведен слой RAN — ранжированных данных); W_{kt}^p — значение параметра, соответствующее k -рангу

на t -временном интервале в p -слое данных; p — идентификатор слоя данных (в данном выражении $p = \text{RAN}$); k — ранг (n — общее количество объектов техноценоза); t — интервал времени (τ — общее количество интервалов модельного времени).

На основе специального хранилища данных может быть сформирован OLAP-куб, который мы определяем как многомерный, долговременный массив хранимых данных техноценоза по энергопотреблению, который используется в процессе интерактивного анализа энергоэффективности (рис. 2) [8].

Ранг	Данные слоя OLAP-куба техноценоза по электропотреблению										
	...	1	2	3	4	5	6	.....	t	.....	τ
1	...	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}	.....	W_{1t}$	.....	W_{1\tau}$
2	...	W_{21}	W_{22}	W_{23}	W_{24}	W_{25}	W_{26}	.....	W_{2t}$	.....	W_{2\tau}$
3	...	W_{31}	W_{32}	W_{33}	W_{34}	W_{35}	W_{36}	.....	W_{3t}$	.....	W_{3\tau}$
4	...	W_{41}	W_{42}	W_{43}	W_{44}	W_{45}	W_{46}	.....	W_{4t}$	.....	W_{4\tau}$
5	...	W_{51}	W_{52}	W_{53}	W_{54}	W_{55}	W_{56}	.....	W_{5t}$	.....	W_{5\tau}$
.....
k	...	W_{k1}	W_{k2}	W_{k3}	W_{k4}	W_{k5}	W_{k6}	.....	W_{kt}$	.....	W_{k\tau}$
.....
n-1	...	$W_{(n-1)1}$	$W_{(n-1)2}$	$W_{(n-1)3}$	$W_{(n-1)4}$	$W_{(n-1)5}$	$W_{(n-1)6}$	.....	$W_{(n-1)t}$	.....	$W_{(n-1)\tau}$
n	...	W_{n1}	W_{n2}	W_{n3}	W_{n4}	W_{n5}	W_{n6}	.....	W_{nt}$	.....	W_{n\tau}$

Рис. 2. OLAP-куб данных техноценоза по параметру электропотребления: W_{kt} — обобщенное обозначение расчетного параметра, составляющего соответствующий слой данных OLAP-куба; k — ранг (n — общее количество объектов техноценоза); t — интервал времени (τ — общее количество фиксируемых интервалов модельного времени)

Следует отметить, что в процессе параметрической виртуализации техноценоза по электропотреблению, помимо создания хранилища данных, зачастую требуется осуществлять так называемое гиперпараметрическое развертывание слоев OLAP-куба. При этом каждый плоский двумерный слой данных развертывается в трехмерный объект — куб данных. В качестве примера рассмотрим развертывание слоя, содержащего дифлекс-параметры техноценоза (дифлекс-слоя), в дифлекс-куб (рис. 3).

В процессе гиперпараметрического развертывания выполняется следующее. Изначально в пределах плоскости слоя дифлекс-параметров [DIF] для каждого момента модельного времени каждому значению топологического ранга ставится в соответствие значение дифлекспараметра, вычислен-

ного в процедуре дифлекс-анализа. Кроме того, если рассмотреть слой отранжированных данных [RAN], то можно увидеть, что в нем каждому значению топологического ранга ставится в соответствие еще и значение дифференциального электропотребления, зафиксированного в определенный момент времени функционирования техноценоза.

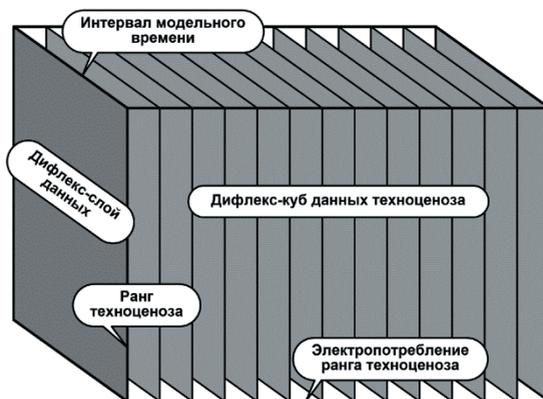


Рис. 3. Структура дифлекс-куба данных по электропотреблению

Мы видим, что имеется возможность поставить в однозначное соответствие три параметра: топологический ранг, дифференциальное электропотребление и дифлекс-параметр. При этом важно связывать данные с учетом точного соответствия как моменту модельного времени, так и значению топологического ранга. Из рисунка 3 видно, что в процессе развертывания дифлекс-слоя мы получаем трехмерный объект, который и является дифлекс-кубом. Необходимость в подобной операции возникает, в частности, при цифровой подготовке данных для построения ранговых гиперпараметрических поверхности и распределения (рис. 4, подробнее [7, 8]).

На рисунке 4 показаны два графических фрагмента: верхний — ранговая гиперпараметрическая поверхность; нижний — ранговое гиперпараметрическое распределение. Оба распределения построены для фиксированного момента времени. Здесь используют следующие обозначения: $\Delta W(W, x)$ — скалярная функция; ΔW — дифлекс-параметр; W — электропотребление; x — ранговая топологическая мера (непрерывный аналог ранга [6]); $\Delta W(W, x, \alpha)$ — скалярная функция, определенная на ранговом гиперпараметрическом распределении; α — дифлекс-угол.

В наших работах [7, 8] описана методика применения ранговых гиперпараметрических распределений в процессе управления электропотреблением. В частности, там введены комплексный критерий оценки процесса электропотребления техноценоза, а также понятие дамадж-параметра — количественная мера ущерба, наносимого техноценозу за счет неэффективного электропотребления (рис. 5).

В качестве перспективного направления развития методов управления рассмотрен переход к динамической оценке, что требует введения динамических дифлекс-функционалов техноценоза (t — время):

$$\begin{cases} \Delta W(t) = F^w(W(t), x(t)); \\ \alpha(t) = F^\alpha(W(t), x(t)). \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) наглядно демонстрирует необходимость параметрического развертывания дифлекс-слоя данных (взятого из OLAP-куба) в дифлекс-куб. Только таким способом можно подготовить все необходимые данные для полноценной реализации цифровой платформы энергоэффективности в процессе управления электропотреблением техноценоза.

Здесь следует вспомнить, что мы рассмотрели гиперпараметрическое развертывание только одного слоя данных (в данном случае — дифлекс-параметров [DIF]). Очевидно, что в процессе управления электропотреблением техноценоза на различных этапах может возникнуть потребность аналогичного развертывания других слоев данных, например: [PRO] — результатов инерционного прогнозирования; [NOR] — норм электропотребления; [LIM] — лимитов электропотребления; [AMC] — добавочных ресурсов МС-ценоза; [AMD] — добавочных ресурсов DC-ценоза; [BIF] — добавочных ресурсов бифуркации; [MOD] — модельных данных. Как правило, подобное развертывание осуществляется с использованием в качестве третьего измерения универсального слоя отранжированных данных по электропотреблению [RAN]. Однако могут использоваться и другие слои.

Полученные в процессе параметрического развертывания кубы данных называются гиперпараметрами. Под гиперпараметром математически рассматривается ранговая гиперпараметрическая поверхность техноценоза — функция двух переменных, заданная в трехмерном ранговом параметрическом пространстве, где множеству значений одного параметра ставится в соответствие множество значений другого параметра и ранговой топологической меры. Данные из разных слоев OLAP-куба (в соответствии с задачами) используют в качестве аргументов гиперпараметра.

Преобразование исходного OLAP-куба (см. рис. 2), при котором отдельные его двумерные слои развертывают в трехмерные кубы данных, позволяет получить четырехмерный объект, который предлагается называть тесерактом техноценоза по электропотреблению (рис. 6).

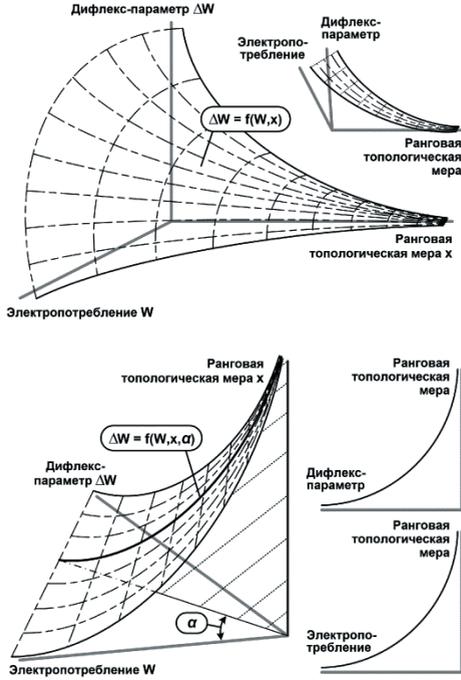


Рис. 4. Ранговые гиперпараметрические поверхность и распределение

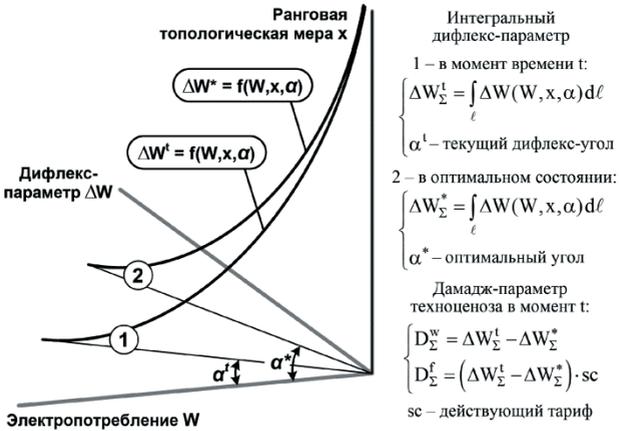


Рис. 5. К понятию дамадж-параметра техноценоза

Тессеракт данных техноценоза по энергопотреблению представляет собой четырехмерный, долго хранимый ряд данных техноценоза, в котором четвертое измерение формируется за счет временно согласованных гиперпараметров. В тессеракте каждый гиперпараметр представлен в виде расширенного куба данных. Адаптация временных данных позволяет избежать многомерности модельного времени, а также транзакционного рассогласования программных функций цифровой платформы энергоэффективности (рис. 7) [6].

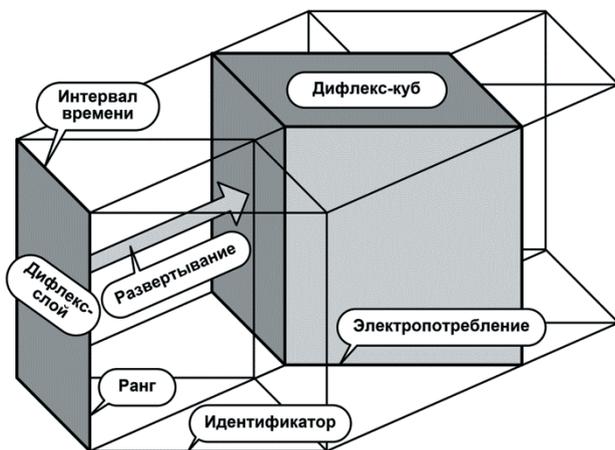


Рис. 6. Тессеракт техноценоза по электропотреблению

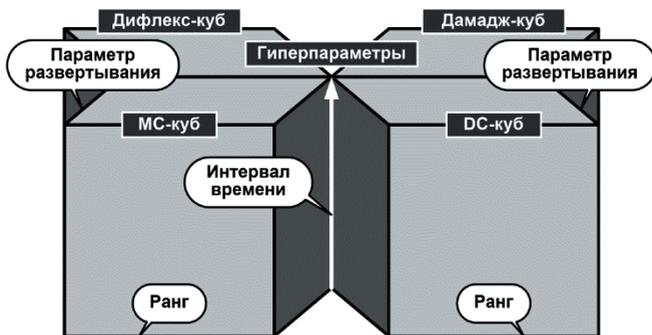


Рис. 7. Темпоральное согласование данных в тессеракте

Ниже в выражении (5) $\langle W_{ktg}^{\text{TSSR}} \rangle$ — кортеж g -го гиперпараметра данных тессеракта техноценоза по электропотреблению; k — ранг (n — общее количество объектов техноценоза); t — интервал времени (τ — общее количество интервалов модельного времени); g — идентификатор гиперпараметра, в котором осуществляется развертывание данных.

Математически параметрический тессеракт данных техноценоза по электропотреблению может быть описан следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \langle W_{kt1}^{\text{TSSR}} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\langle \begin{array}{ccccc} [\text{RAW}]_{kt1} & [\text{DIF}]_{kt1} & [\text{IPK}]_{kt1} & [\text{AMC}]_{kt1} & [\text{DAM}]_{kt1} \\ [\text{VER}]_{kt1} & [\text{PRO}]_{kt1} & [\text{IPZ}]_{kt1} & [\text{AMD}]_{kt1} & [\text{VRO}]_{kt1} \\ [\text{RAN}]_{kt1} & [\text{NOR}]_{kt1} & [\text{IPE}]_{kt1} & [\text{BIF}]_{kt1} & [\text{VRR}]_{kt1} \\ [\text{APP}]_{kt1} & [\text{LIM}]_{kt1} & [\text{DFU}]_{kt1} & [\text{MOD}]_{kt1} & [\text{VOT}]_{kt1} \end{array} \right\rangle; \\
 \langle W_{kt2}^{\text{TSSR}} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\langle \begin{array}{ccccc} [\text{RAW}]_{kt2} & [\text{DIF}]_{kt2} & [\text{IPK}]_{kt2} & [\text{AMC}]_{kt2} & [\text{DAM}]_{kt2} \\ [\text{VER}]_{kt2} & [\text{PRO}]_{kt2} & [\text{IPZ}]_{kt2} & [\text{AMD}]_{kt2} & [\text{VRO}]_{kt2} \\ [\text{RAN}]_{kt2} & [\text{NOR}]_{kt2} & [\text{IPE}]_{kt2} & [\text{BIF}]_{kt2} & [\text{VRR}]_{kt2} \\ [\text{APP}]_{kt2} & [\text{LIM}]_{kt2} & [\text{DFU}]_{kt2} & [\text{MOD}]_{kt2} & [\text{VOT}]_{kt2} \end{array} \right\rangle; (5) \\
 \dots\dots\dots \\
 \langle W_{ktg}^{\text{TSSR}} \rangle &\xrightarrow[t=1..\tau]{k=1..n} \left\langle \begin{array}{ccccc} [\text{RAW}]_{ktg} & [\text{DIF}]_{ktg} & [\text{IPK}]_{ktg} & [\text{AMC}]_{ktg} & [\text{DAM}]_{ktg} \\ [\text{VER}]_{ktg} & [\text{PRO}]_{ktg} & [\text{IPZ}]_{ktg} & [\text{AMD}]_{ktg} & [\text{VRO}]_{ktg} \\ [\text{RAN}]_{ktg} & [\text{NOR}]_{ktg} & [\text{IPE}]_{ktg} & [\text{BIF}]_{ktg} & [\text{VRR}]_{ktg} \\ [\text{APP}]_{ktg} & [\text{LIM}]_{ktg} & [\text{DFU}]_{ktg} & [\text{MOD}]_{ktg} & [\text{VOT}]_{ktg} \end{array} \right\rangle.
 \end{aligned}$$

Произведем гиперпараметрическое развертывание данных на примере Калининградской области. При этом в качестве объектов будем рассматривать системообразующие подстанции 110 кВ региональной сетевой компании АО «Янтарьэнерго». Краткая характеристика исследуемого техноценоза приведена на рис. 8, а фрагмент базы данных — на рис. 9.

На основе месячных данных по электропотреблению подстанций АО «Янтарьэнерго» за период 2008—2020 гг. рассчитаем дифлекс-параметры. При этом будем использовать стандартные расчетно-графические модули из состава информационно-аналитического комплекса «Управление электропотреблением техноценоза» [1]. Пример расчета в графической форме для одного из временных интервалов приведен на рис. 10.

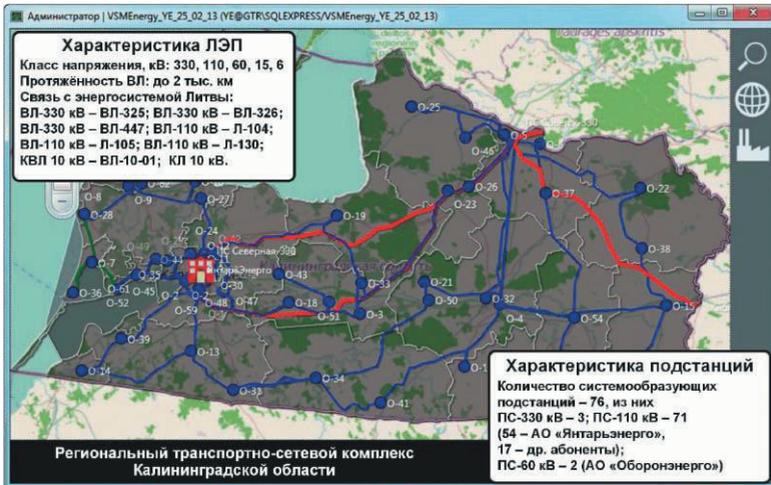


Рис. 8. Характеристика подстанций АО «Янтарьэнерго»

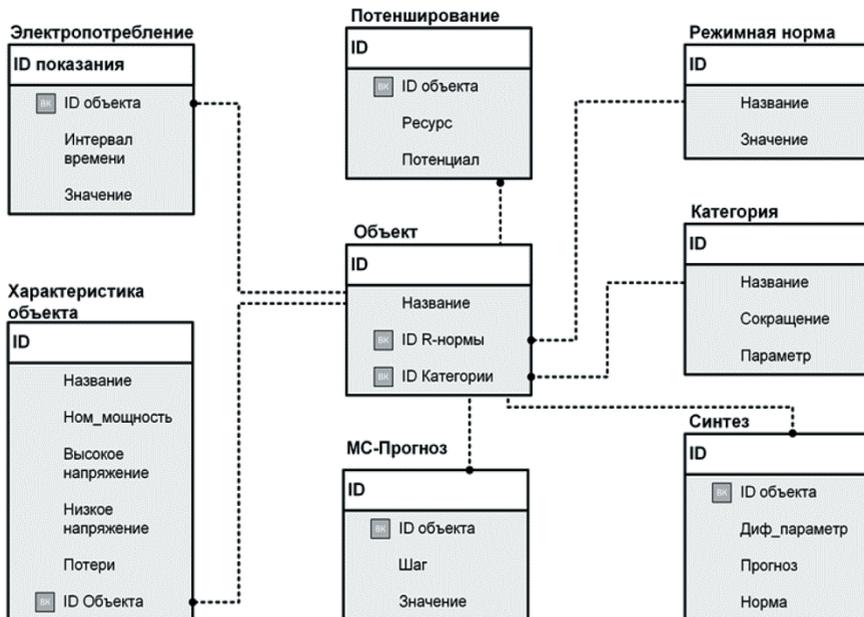


Рис. 9. База данных АО «Янтарьэнерго» по электропотреблению



Рис. 12. Ранговая гиперпараметрическая поверхность

Полученный дифлекс-куб является весьма полезным инструментом, который может найти применение в управлении электропотреблением. В частности, с его помощью могут быть рассчитаны такие важные количественные оценки показателя качества процесса электропотребления, как интегральные дифлекс-параметр и дамадж-параметр техноценоза:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta W_{\Sigma}^{t=T} = \sum_{i=1}^n (\Delta W_i^{t=T}); \\ \Delta W_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^n (\Delta W_{ti}); \\ \Delta D_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{\tau} \sum_{i=1}^n (\Delta W_{ti} \cdot sc_{ti}), \end{array} \right. \quad (7)$$

где $\Delta W_{\Sigma}^{t=T}$ — интегральный дифлекс-параметр техноценоза, вычисленный на временном интервале $t = T$; $\Delta W_i^{t=T}$ — дифлекс-параметр i -го объекта техноценоза, вычисленный на временном интервале $t = T$; ΔW_{Σ} — интегральный дифлекс-параметр техноценоза; ΔD_{Σ} — интегральный дамадж-параметр техноценоза; ΔW_{ti} — дифлекс-параметр i -го объекта техноценоза,

вычисленный на t -ом временном интервале; ΔD_{Σ} — интегральный дамадж-параметр техноценоза; $sc_{i,t}$ — тариф на электроэнергию, предъявляемый i -му объекту техноценоза на t -м временном интервале; n — общее число объектов техноценоза; τ — общее количество временных интервалов.

В частности, для исследуемого РТСК получены следующие результаты, которые рассчитаны на основе значений тарифов, указанных в Приказах службы по государственному регулированию цен и тарифов Калининградской области «Об установлении средневзвешенной стоимости электрической энергии (мощности), приобретаемой гарантирующим поставщиком АО «Янтарьэнергосбыт» на розничном рынке электроэнергии по регулируемым ценам на 2017, 2018 и 2019 гг.» (см. таблицу).

**Количественная оценка показателя качества
процесса электропотребления по годам**

Наименование показателя	2017	2018	2019
Интегральный дифлекс-параметр, вычисленный за год ($\Delta W_{\Sigma}^{t=T}$), МВт·ч/год	$6,6 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^5$
Интегральный дамадж-параметр ΔD_{Σ} за год при использовании средневзвешенного тарифа за 1-е полугодие, млн руб/год	1,9	1,6	22,6
Интегральный дамадж-параметр ΔD_{Σ} за год при использовании средневзвешенного тарифа за 2-е полугодие, млн руб/год	1,7	4,3	26,1

Стоит отметить, что благодаря цифровой платформе энергоэффективности мы можем говорить о параметрическом цифровом двойнике техноценоза в управлении электропотреблением. Платформа должна обеспечивать пять потоков данных: очистку и абстрагирование, инерционную, динамическую и бифуркационную обработку и обратную адаптацию. Это улучшит качество управления на всех этапах процесса потребления энергии. Однопараметрический цифровой двойник техноценоза — это непрерывно меняющийся цифровой профиль, содержащий современное хранилище данных по электропотреблению рангов и/или объектов техноценоза. Хранилище данных техноценоза в потреблении электроэнергии представляет собой предметно-ориентированную информационную базу данных, которая организована в виде тессеракта данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гнатюк В.И.** Техника, техносфера, энергосбережение [Сайт] Режим доступа: <http://www.gnatukvi.ru>, свободный, [рег. от 23.11.2005 № 5409].
2. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2012. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/zakon.pdf>, свободный.
3. **Меркулов А.А., Колесников А.В.** Универсальный паттерн организации ситуационных центров. М.: Системы и средства информатики, 2013. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/pattern.pdf>.
4. **Луценко Д.В.** Комбинаторная теория ранговой динамики [Трактат]. Электронные данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2018. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ktrd.pdf>, свободный.
5. **Кивчун О.Р.** Векторный ранговый анализ [Трактат]. Электронные данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/vran.pdf>, свободный.
6. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов [Монография]. 3-е изд., перераб. и доп. Электронные текстовые данные. Калининград: Изд-во КИЦ «Техноценоз», 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>, свободный.
7. **Гнатюк В.И.** Критерий оценки качества электропотребления техноценоза [Статья] // Новые перспективы рангового анализа. Электронные текстовые данные. Калининград, 2019. Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/index.files/giperkache.pdf>, свободный.
8. **Гнатюк В.И.** Цифровой двойник техноценоза по электропотреблению [Трактат]. Электронные данные. Калининград, 2020. Режим: <http://gnatukvi.ru/index.files/cifrodvoyn.pdf>, свободный.

*В.И. Гнатюк, mail@gnatukvi.ru, КГТУ,
О.Р. Кивчун, Oleg_kivchun@mail.ru, БФУ им. И. Канта,
Д.Г. Морозов, morozov@dmityry.by, КИЦ, г. Калининград*

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ РЕЖИМНОГО НОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДСИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В работах профессора В.И. Гнатюка [2, 4, 6] показано, что основой любой энергосистемы является региональный электроэнергетический комплекс (РЭНК), который включает в себя региональный электротехнический комплекс (РЭК), резервный генерирующий комплекс (РРГК), региональный транспортно-сетевой комплекс (РТСК), основной региональный генерирующий комплекс (ОРГК) и систему материально-технического обеспечения (рис. 1).



Рис. 1. Подсистемы регионального электроэнергетического комплекса

Каждая из подсистем имеет ряд важных задач, которые нацелены на повышение энергоэффективности в различных сферах. Проблема ее повышения актуальна для различных сфер жизнедеятельности человека. Для РЭК данная проблема вызывает значительные трудности: в РТСК при соблюдении баланса электрических мощностей потребителей в энергосистеме и в РЭК при необходимости управления электропотреблением приемников электроэнергии. Следует отметить, что потребители электроэнергии РЭК и, в частности, их приемники электроэнергии могут оказывать значительное влияние на соблюдение баланса электрических мощностей потребителей в энергосистеме.

В настоящее время для решения данных проблем существуют организационные и технические меры регулирования энергоэффективности, которые регламентированы Федеральным законом от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Организационные меры регулируют процесс электропотребления, как правило, документально регламентируя, как должен быть организован процесс электропотребления и повышения эффективности использования электрической энергии. Также они включают в себя проведение анализа эффек-

тивности рационального использования электроэнергии, проведение исследований по регулированию и оптимизации графиков нагрузки, массово-разъяснительные работы по более рациональному использованию электрической энергии, организацию общественных смотров, регламентирование электропотребления в электросиловых установках, рациональный режим использования электроосвещения, регулирование и контроль взаиморасчетов с участниками рынка электроэнергии и др.

Что же касается технических мер, то в общей массе они минимальны, как правило, это технические решения для ограничения холостого хода станков, таймеры и датчики выключения осветительных приборов, снижение потерь в сетях и линиях электропередач и в силовых трансформаторах, реконструкция электросетей и перевод их на повышенное напряжение, подключение резервных линий электропередач, установка экономически выгодного режима одновременной работы трансформаторов. Однако сегодня технические меры не могут жестко понуждать потребителя соблюдать план потребления электроэнергии или делать это автоматически и в режиме реального времени.

Таким образом, на основе анализа содержания организационных и технических мер по повышению энергоэффективности на объектах РЭНК, а также, учитывая требования Ф3-261, необходимо решить ряд важных задач. Необходимы разработка и внедрение ряда обоснованных методик и процедур, направленных на создание научно-методических предпосылок по повышению энергоэффективности [3—7].

Одним из таких решений является реализация процедуры режимного нормирования электропотребления, под которой понимают процедуру нормирования параметра (электропотребления) объектов, предполагающая вынужденное планомерное снижение электропотребления.

Данная процедура разработана на основе методологии рангового анализа и подразумевает реализацию математического аппарата R -распределений (рис. 2). Ее целью является формирование плана ограничений по электропотреблению без нарушения технологического процесса.

Разработано и реализуется три вида R -распределений: $R3$ -распределение, $R2$ -распределение и $R1$ -распределение. На основе каждого распределения формируется свой режим. Для $R3$ -распределения устанавливается режим, при котором ограничиваются по электропотреблению, не нарушая технологический процесс, объекты третьей категории. При построении $R2$ -распределения учитывается ограничение потребителей или приемников дополнительно второй категории. Соответственно при $R1$ -распределении осуществляется построение с учетом ограничения потребителей первой, второй и третьей категорий, кроме тех потребителей, отключение которых недопустимо. На рисунке 2 представлено графическое отображение этих распределений.

Гиперболическая форма R -распределений получается на основе учета добавочного ресурса для каждого режима функционирования. При анализе графиков плановых отключений потребителей электроэнергии определяется итоговое расчетное электропотребление каждого потребителя. Например, для условий $R1$ -режима можно записать [5]:

$$\{(W_1^{R1}, r_1 = 1); (W_2^{R1}, r_2 = 2); (W_3^{R1}, r_3 = 3); \dots; (W_k^{R1}, r_k); \dots; (W_{n1}^{R1}, r_{n1})\},$$

где W_k^{R1} — электропотребление потребителя; r_k — ранг потребителя; n_1 — число объектов $R1$ -режима.

Таким образом, предлагается дополнить организационные и технические меры повышения энергоэффективности объектов РТСК научно обоснованной процедурой режимного нормирования электропотребления основных потребителей, которые подключены в центрах питания электросети. При реализации процедуры режимного нормирования на данном уровне повышение энергоэффективности будет осуществляться за счет формирования и поддержания базы данных категорирования объектов по электроснабжению, реализации плана ресурсных ограничений по электропотреблению на основе аппарата R -распределений и коррекции критерия надежности энергосистемы с целью уменьшения технологического ущерба, связанного с недоотпуском электроэнергии [1] (рис. 3).

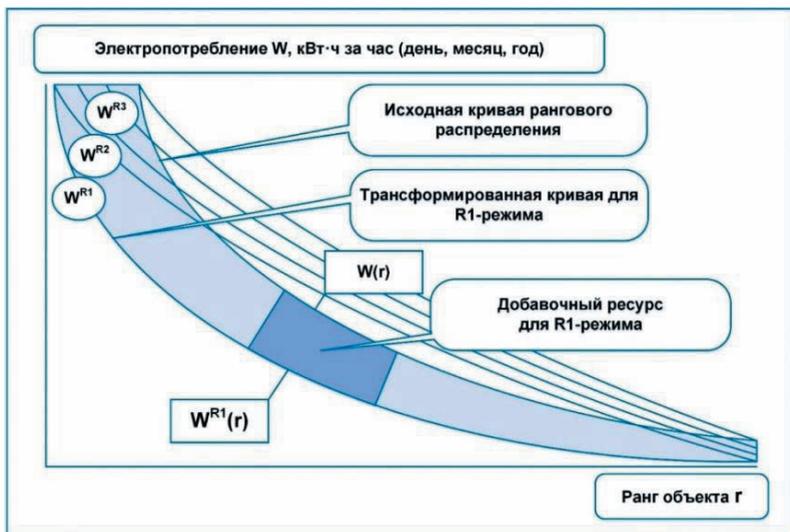


Рис. 2. R -распределения в процедуре режимного нормирования



Рис. 3. Место процедуры режимного нормирования при реализации мер повышения энергоэффективности для объектов РТСК

При управлении электропотреблением РЭК (техноценоза) (см. рис. 2) повышение энергоэффективности будет осуществляться за счет формирования и поддержания базы данных категорирования приемников потребителей электроэнергии (учет может быть осуществлен до приемников в отдельной квартире), реализации плана ресурсных ограничений по электропотреблению на основе аппарата R -распределений и снижения прямых затрат, связанных с расходами на эксплуатацию электроустановок и использование объемов электроэнергии (рис. 4) [1, 7].

Таким образом, анализ актуальности реализации процедуры режимного нормирования по электропотреблению для подсистем РЭНК позволил установить, что в первую очередь данную процедуру рекомендуется реализовывать при соблюдении баланса электрических мощностей потребителей РТСК и необходимости управления электропотреблением приемников электроэнергии объектов РЭК.

При реализации процедуры режимного нормирования на объектах РТСК повышение энергоэффективности будет осуществляться за счет формирования и поддержания базы данных категорирования объектов по электроснабжению, реализации плана ресурсных ограничений по электропотребле-

нию на основе аппарата R -распределений и коррекции критерия надежности энергосистемы с целью уменьшения технологического ущерба, связанного с недоотпуском электроэнергии.

База данных категорирования объектов по электроснабжению содержит основную информацию об энергосистеме объекта. Систематизированная совокупность таблиц описывает связи от конечного потребителя до поставщика электроэнергии. Таблица «Помещения» связана с таблицами «Здания и сооружения», далее, как по цепочке, идут связи с таблицами «Фидеры», «Подстанции»; заканчивается таблицей «Линии электропередач». Самая первая таблица из этой цепочки — таблица «Устройства сбора», на нее ссылается таблица «Приборы» (подключенные к электрической сети). База данных категорирования объектов по электроснабжению накапливает, хранит и управляет данными о потребителях электроэнергии на объектах регионального электротехнического комплекса. Дополнительные таблицы помогают правильно описать, характеризовать и категорировать приемник электроэнергии. Это такие таблицы, как «Категории по надежности электроснабжения», «Группы электропотребления», «Вид оборудования», «Вид идентификатора», «Электропотребление» [5].



Рис. 4. Место процедуры режимного нормирования при реализации мер повышения энергоэффективности для объектов РЭК

Таблица «Состояние устройств» показывает, в каком состоянии находится приемник электроэнергии (выключен он или включен), а также хранит всю историю состояний каждого из приемников электроэнергии. Таблица «Электропотребление» содержит информацию об электропотреблении приемников электроэнергии за одну единицу времени. Одной из ключевых таблиц является таблица «Категории по надежности электроснабжения», которая категоризирует все приемники электроэнергии по группам надежности электропотребления [5].

Очень важное значение имеет таблица «Идентификаторы устройства» — это уникальный идентификатор устройства, который никогда не повторяется, и привязан к устройству навсегда. Можно сказать, что это «цифровой отпечаток устройства», который идентифицирует нужного нам потребителя или необходимую группу потребителей для применения процедуры режимного нормирования и, как следствие, формирования и реализации плана ресурсных ограничений [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ананичева С.С., Котова Е.Н.** Проектирование электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 164 с.
2. **Гнатюк В.И., Кивчун О.Р., Луценко Д.В.** Динамическая модель управления электропотреблением объектов припортового электротехнического комплекса // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4—2 (38). С. 112—116.
3. **Кивчун О.Р.** Метод управления электропотреблением объектов регионального электротехнического комплекса на основе синтеза процедур рангового анализа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 2. С. 500—513.
4. **Режимное** нормирование электропотребления при эксплуатации объектов регионального электротехнического комплекса / В.И. Гнатюк, О.Р. Кивчун, Д.В. Луценко, Д.Г. Морозов // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4—3 (42). С. 116—120.
5. **Кивчун О.Р.** Управление электропотреблением энергосистемы на основе мониторинга результатов процедур рангового анализа // Фёдоровские чтения — 2020: Тр. 50-й межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.
6. **Гнатюк В.И., Докучаев А.В., Кивчун О.Р.** Планирование электропотребления электротехнического комплекса // Фёдоровские чтения — 2019: Тр. 49-й межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.
7. **Кивчун О.Р.** Исследование объектов техноценологического типа на основе векторного рангового анализа // Фёдоровские чтения — 2018: Тр. 48-й межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2018.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРИНЦИПА ЧИСЛОВОЙ АСИММЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИИ И РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ЦЕХА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В [1] представлена методология принципа самоподобия для исследования и поэлементного расчета электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия (ЭМЦПП). В ее основу положена форма, одинаковая для целого и его частей. Эта форма позволяет получить самоподобную гиперболическую структуру. Для исследования и расчета ЭМЦПП, кроме формы, вводят также величину ресурса. И далее рассматривают форму и ресурс совместно.

Следует отметить, что двухслойная модель многономенклатурного цеха, разработанная для решения проблемы поэлементного расчета ЭМЦПП, также ориентирована на совместное рассмотрение самоподобной формы и ресурса электропотребления. Становится понятным, что принцип самоподобия сам по себе является недостаточным для той цели, для которой его применение декларируют [1]. В большей степени ей соответствует принцип двойственности, ориентированный на совместное рассмотрение формы и ресурса. Этот принцип формально воспроизводит числовая асимметрия, предназначенная для исследования сложных систем и ценозов [2].

Методология принципа числовой асимметрии направлена на поиск и исследование таких объектов, которые имеют две стороны, обладающие, в определенном смысле, противоречивыми свойствами. Например, такие свойства имеет модель электропотребления, включающая конечный ресурс электропотребления и бесконечную (в потенци) гиперболическую структуру этого ресурса. Кроме того, числовая асимметрия является моделью природного фрактала, (техно)ценоза, термодинамической системы, включающей также некий ресурс и соответствующую ей древесную гиперболическую структуру. Причем гиперболическая структура, соответствующая ресурсу, является инвариантом, т.е. она остается гиперболической при разных значениях ресурса, распределенного в природном фрактале, (техно)ценозе, термодинамической системе.

Если использовать гиперболическую структуру в качестве своеобразной системы координат, то можно количественно сравнивать два ресурса, распределенных в сложной системе. Эту связь выражают в виде закона масштабирования, показывающего в общем случае, что некоторые феномены нашего мира имеют одинаковую структуру при рассмотрении их в любом масштабе. Указанная связь позволяет решить проблему и разработать мето-

дику поэлементного расчета ЭМЦПП. Имея расчетный ресурс и экспериментально установленный показатель степени, связывающий масштабы, получают точную оценку ЭМЦПП.

Приведем пример использования математического инструментария принципа числовой асимметрии для исследования и расчета ЭМЦПП.

Проблема поэлементного расчета ЭМЦПП [1, 3]. Поэлементный расчет ЭМЦПП, кВт·ч, выполняют на основе базы данных электрооборудования многономенклатурного цеха и получают:

$$W = \sum_{j=1}^n W_j, \quad (1)$$

где W, W_j — соответственно расчетное месячное ЭМЦПП и его составляющие:

$$W_j(i) = W_o i^{-\alpha}, \quad (2)$$

где W_o — константа электропотребления; i — ранг; α — показатель степени гиперболического (степенного) распределения

Проблема расчета заключается в том, что расчетное ЭМЦПП через составляющие всегда превышает ЭМЦПП, полученное по приборам учета за тот же период времени:

$$W > V, \quad (3)$$

где W, V — соответственно расчетное и приборное месячное ЭМЦПП.

Из выражения (1) следует, что величину ЭМЦПП складывают из частей, т.е. величина ЭМЦПП аддитивна и конечна. Выражение для гиперболического (степенного) распределения ЭМЦПП (2) мультипликативно и не имеет естественной границы. При этом возникает противоречие между полученными результатами. Одно выражение для ЭМЦПП (1) конечно, а выражение (2) может быть ограничено лишь искусственным путем.

Проблема создает препятствие для разработки методики поэлементного расчета ЭМЦПП.

Кроме того, структура системы электроснабжения промышленного предприятия имеет иерархическую структуру (1УР—5УР), представленную на рис. 1; видно, что моделью этой структуры является 2-адическое число. В общем случае модель может представлять смесь p -адических чисел. Распределение размеров и количества элементов на уровнях p -адического дерева имеют экспоненциальное распределение, а распределение уровней — гиперболическое (степенное) распределение. Здесь

уместно обратить внимание на аналогию между гиперболической структурой электроснабжения и гиперболической структурой электропотребления многономенклатурного цеха.

Числовая модель объединяет вещественное и p -адическое представление рационального числа.

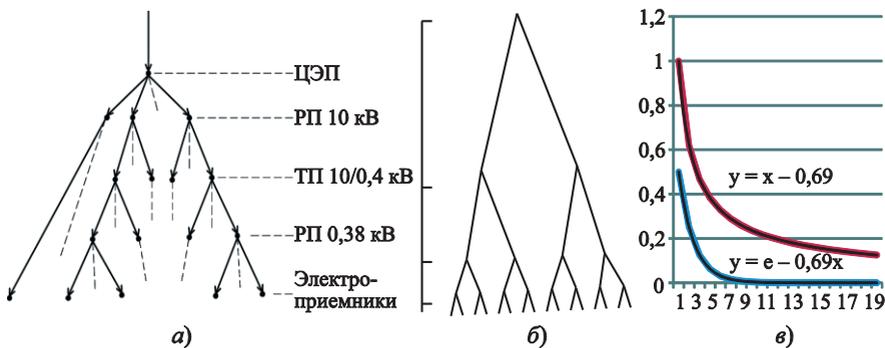


Рис. 1. Структура иерархической системы промышленного предприятия, ее модель в виде 2-адического числа и графики распределения размеров элементов модели на уровнях (экспоненты) и распределения уровней (гиперболы): a — дерево-схема системы электроснабжения промышленного предприятия; b — схема целого 2-адического числа; c — экспоненты и гиперболические распределения 2-адического числа

Формальное выражение **числовой асимметрии** имеет вид

$$R \leftarrow Q \rightarrow Z_p, \tag{4}$$

где Q, R, Z_p — соответственно поле рациональных, вещественных и целых p -адических чисел [4].

Числовая модель объединяет вещественное и p -адическое представление рационального числа.

Рациональное число в математике представляет собой отношение двух целых чисел, поэтому оно есть «физическое» число. С его помощью выполняют измерения физических величин. Например, физическому параметру электропотребления сопоставляют рациональное число на шкале прибора измерения. Моделями рационального числа можно считать вещественное и p -адическое числа. Поле вещественных чисел R и поле целых p -адических чисел Z_p (поле p -адических чисел Q_p) получают пополнением поля рациональных чисел Q . Под пополнением (расширением) метрического пространства X понимают присоединение к нему пре-

делов фундаментальных последовательностей. Пополнение поля Q осуществляется с помощью вещественных или p -адических норм.

Естественность двойного нормирования p -адических чисел позволяет записать рациональное число через сопряженные нормы (абсолютные значения):

$$|y|_{\infty} |x|_p^{\alpha} = c, \quad c \in Q, \quad (5)$$

где $|y|_{\infty}$ и $|x|_p^{\alpha}$ — соответственно норма (абсолютное значение) на поле вещественных чисел и норма (абсолютное значение) на поле p -адических чисел; α — фиксированное вещественное число.

Двухслойная модель электропотребления ЭМЦПП [1, 3]. Разрешить противоречие, представленное выражениями (1) и (2), позволяет двухслойная модель ЭМЦПП, аналогичная выражению числовой асимметрии (4):

$$W_* \leftarrow W \rightarrow W^*, \quad (6)$$

где W_*, W^* — соответственно ресурсный, или энергетический, и иерархический, или структурный, слои электропотребления цеха; \leftarrow и \rightarrow — знаки отображения [1, 3].

Модель (6) объединяет ресурсный и иерархический слои ЭМЦПП. Ресурсная часть модели позволяет получить баланс ЭМЦПП, иерархическая — зафиксировать границы и связи между его потребителями электрической энергии.

Двухслойная модель позволяет также ввести и исследовать меры, размерности и нормы слоев (пространств) ЭМЦПП.

Мера ресурсной части может быть получена на основе покрытия множества ресурса конечным числом шаров $N(a)$ радиуса a :

$$W_* = \lim_{a \rightarrow 0} N(a)a^2, \quad (7)$$

где $N(a)$ — количество шаров покрытия; $a > 0$ — радиус шара покрытия; 2 — размерность ресурсного пространства.

Отсюда видно, что с геометрической точки зрения ресурс ЭМЦПП представляет собой площадь, имеющую размерность 2.

Меру иерархической части следует записать в виде

$$W^* = \lim_{a \rightarrow 0} N(a)a^d, \quad (8)$$

где d — размерность иерархического пространства ЭМЦПП.

Иерархическая структура имеет размерность, не равную целому числу. В двухслойной модели слой структуры имеет размерность Хаусдорфа—Безиковича в диапазоне $1 < d < 2$, поэтому можно считать, что модель ЭМЦПП имеет свойства природного фрактала. Размерность иерархической структуры находят экспериментально.

Выражение (7) позволяет получить величину ЭМЦПП на евклидовой плоскости, а выражение (8) представляет собой числовую характеристику фрактала-дендрита.

Размерность площади ресурса и размерность структуры иерархического дерева связаны через коразмерность — показатель Херста h . Этот показатель получают по выражению $2 - d = h$ [3].

Если рассматривать слои модели как пространства, то можно ввести нормы ресурсной $\|W_*\|$ и иерархической $\|W^*\|$ частей модели. Произведение этих норм по аналогии с произведением норм вещественного и p -адического числового поля [3] позволяет получить значение некоторой величины ЭМЦПП:

$$\|W_*\| \cdot \|W^*\| = c, \quad c - \text{const} \in W. \quad (9)$$

Нетрудно увидеть, что нормы в выражении (9) связаны гиперболической зависимостью.

Закон масштабирования [1, 3]. Гиперболическое распределение ЭМЦПП позволяет найти связь между его расчетной величиной (W) и величиной, полученной по приборам учета (V) [1, 3]. Площади электропотребления, ограниченные гиперболами, вычисляют по выражениям

$$\int_1^a \frac{dw}{w} = \ln W, \quad \int_1^a \frac{dv}{v} = \ln V. \quad (10)$$

Если существует отношение-константа в виде

$$d = \frac{\ln W}{\ln V} - \text{const}, \quad (11)$$

то выражение (11) позволяет записать закон масштабирования ЭМЦПП в виде

$$W = V^d. \quad (12)$$

Закон масштабирования ЭМЦПП можно получить также через теорию категорий. Элементарный топос — есть декартово замкнутая, конечно полная категория, с классификатором подобъектов. Он имеет вид

$$\begin{array}{ccc}
 V & \xrightarrow{f} & W \\
 \downarrow ! & & \downarrow \chi \\
 1 & \xrightarrow{T} & \Omega
 \end{array}, \quad (13)$$

где V, W — фактическое и расчетное пространства ЭМЦПП соответственно; 1 и Ω — конечный объект и классификатор подобъектов соответственно. Знаки $f, T, !, \chi$ обозначают соответственно: исходная стрелка, стрелка «истина», единственная стрелка, характеристическая стрелка [3].

Из декартовой замкнутости элементарного топоса (13) следует существование декартова замкнутого выражения:

$$\begin{array}{ccc}
 v \times c & \rightarrow & v \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 w & \rightarrow & w^c
 \end{array}, \quad (14)$$

На основе выражения (14) можно записать:

$$\text{hom}(v \times c, w) \cong \text{hom}(v, w^c), \quad (15)$$

где $v \in V$, $w \in W$, c — показатель степени, $v \times c$ — декартово произведение.

Другими словами, из выражений (14) и (15) видно, что топос содержит экспоненты. Тогда существует степенная связь расчетного и фактического (приборного) ЭМЦПП в виде:

$$V = W^C. \quad (16)$$

Коэффициент подобия является инвариантом гиперболических распределений. Он связан с отношением площадей ЭМЦПП (12):

$$d = C^{-1} = \log_V W. \quad (17)$$

Методика поэлементного расчета ЭМЦПП [3]. Расчет ЭМЦПП выполняют по выражениям (1) и (2). Расчет коэффициента подобия (инварианта цехового ЭМЦПП) проводят на основании данных предыдущего месяца по выражению

$$d = (\ln W)(\ln V)^{-1}, \quad (18)$$

где V — месячное электропотребление цеха, соответствующее расчетному электропотреблению W , по приборам учета, кВт·ч.

Уточненное месячное ЭМЦПП, кВт·ч, находят по выражению

$$V = W^{(d^{-1})}. \quad (19)$$

Предложенная методика позволяет получать более точные значения электропотребления многоменклатурного цеха промышленного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хорьков С.А.** Методология принципа самоподобия в исследовании электропотребления многоменклатурного цеха промышленного предприятия // Фёдоровские чтения — 2020. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 65—72.
2. **Маврикиди Ф.И., Хорьков С.А.** Системно-ценологический подход к математическому моделированию техногенных объектов // Управление техносферой. 2020. Т. 3. Вып. 3. С. 401—426.
3. **Хорьков С.А.** Проблема расчета электропотребления многоменклатурного цеха промышленного предприятия, модели и методики для ее решения: монография. Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. 124 с.
4. **Коблиц Н.** *p*-адические числа, *p*-адический анализ и дзета-функции / пер. с англ. В.В. Шокурова; под ред. и с предисловием Ю.И. Манина. М.: Мир, 1981. 192 с.

*М.А. Булатенко, tabulatenko@gmail.com,
НИУ «МЭИ», Москва*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ КАК ОСНОВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

В Стратегии национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 г. № 683 [2] подчеркивается неразрывная взаимосвязь и взаимозависимость национальной безопасности Российской Федерации и социально-экономического развития страны, что свидетельствует о важной роли экономической энергетической безопасности. Деятельность Минэнерго России по развитию отраслей ТЭК неизменно сосредоточена на ряде приоритетных направлений, обозначенных президентом и правительством страны в доктрине энергетической безопасности Российской Федерации [1] и энергетической стратегии РФ [4].

Топливо является одним из важнейших источников энергии и представляет собой основу для обеспечения энергетической безопасности страны. В то же время для ее обеспечения, с точки зрения функционирования топливной энергетической инфраструктуры, важно обеспечить стабильное функционирование предприятий нефтяной отрасли. Во время карантинных мер, введенных из-за распространения COVID-19, наблюдалось сокращение спроса на энергетические ресурсы, что при сохранении предложения со стороны нефтяных компаний привело к резкому снижению цен на энергоносители, вследствие чего предприятия нефтяной отрасли находятся в кризисных условиях.

Одна из основных составляющих процесса обеспечения экономической безопасности хозяйствующего субъекта есть работа по повышению уровня его платежеспособности, ликвидности, финансовой устойчивости, рентабельности и обеспечения качественного планирования и ведения финансово-хозяйственной деятельности.

Анализ научной литературы и нормативных документов различных органов, в обязанности которых входит проведение финансового анализа, показал, что каждый субъект, осуществляющий оценку, руководствуется своим перечнем показателей, по-разному их группирует, но в целом различия не столь существенны и сводятся к анализу показателей ликвидности; финансовой устойчивости и платежеспособности; рентабельности; деловой активности (оборачиваемости) [3, 5—7].

Для сравнительного (пространственного) анализа финансовой составляющей экономической безопасности предприятия по МСФО предлагается рассчитать и проанализировать в динамике 33 показателя. И если для одной нефтяной компании еще можно провести данный финансовый анализ вручную и с помощью аналитических способностей одного человека, то совершенно очевидно, что одновременно для всех компаний в отрасли оперативно и достоверно это сделать возможно только с помощью технических средств и цифровых технологий.

В условиях цифровой экономики несомненные преимущества при принятии управленческих решений заключаются в том, что руководители субъектов бизнеса имеют возможность получать большие объемы информации в необходимых разрезах в кратчайшие сроки. В связи с открывающимися возможностями применение цифровых технологий в бухгалтерском учете будет способствовать дальнейшему развитию автоматизации большого количества функций.

Хорошая платформа для науки о данных и машинного обучения должна предлагать специалистам по обработке данных строительные блоки для решения проблемы DataScience. Платформа для анализа данных работает как хранилище различных инструментов, позволяющих

реализовать весь процесс моделирования данных. Эти платформы не только позволяют специалистам по обработке данных создавать точные выводы на основе информации, собранной из различных ресурсов, но также помогает им сообщить о возможных результатах клиентам или заинтересованным сторонам.

Для практической реализации выбрана платформа KNIME Analytics — бесплатное программное обеспечение с открытым исходным кодом для анализа больших данных [8]. Данный фреймворк позволяет реализовывать полный цикл анализа данных, включающий их чтение из различных источников, преобразование и фильтрацию, собственно анализ, визуализацию и экспорт.

В качестве исходных данных в исследовании приняты пять Excel-файлов по пяти разным нефтяным компаниям, каждый из файлов содержит в себе МСФО-отчетности за последние пять лет (за 2016—2020 гг.) и проведенные расчеты за каждый год по 33 показателям финансовой составляющей экономической безопасности предприятия. Каждый файл содержит в себе девять рабочих листов. Такой достаточно большой массив исходных данных можно назвать большими данными.

В KNIME AnalyticsPlatform процесс программирования логики осуществляется через создание рабочего процесса (Workflow), который состоит из узлов (или «нод», Node), выполняющих ту или иную функцию (например, чтение данных из исходной базы данных, трансформация / преобразование/обработка, визуализация). Узлы, соответственно, соединяются между собой стрелками, которые показывают направление движения и обработки данных. Примеры одного рабочего процесса с входящими в него подпроцессами представлены на рис. 1—3.

Узел «Интерактивная гистограмма (локальная)» («InteractiveHistogram (local)») отображает интерактивное представление гистограммы с различными параметрами просмотра (рис. 4).

Узел «Диаграмма солнечных лучей» («SunburatChart», рис. 5) отображает иерархические данные в радиальном расположении: круг в центре диаграммы представляет корневой узел иерархии; секции, расположенные дальше «снаружи», представляют собой узлы, расположенные глубже в иерархии; каждый листовый узел имеет прикрепленный атрибут значения; для сечений, соответствующих конечным узлам, область выводится из атрибута значения конечного узла; для секций, не соответствующих листовым узлам, площадь получается из накопленного значения всех нисходящих листовых узлов.

Для расчета и визуализации данных по 33 показателям для анализа финансовой составляющей экономической безопасности одновременно по пяти разным предприятиям нефтяной отрасли за последние пять лет разработано четыре рабочих процесса в KNIME AnalyticsPlatform (рис. 6).

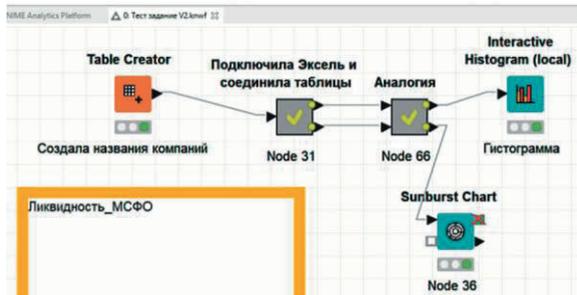


Рис. 1. Рабочий процесс «Показатели ликвидности по МСФО»

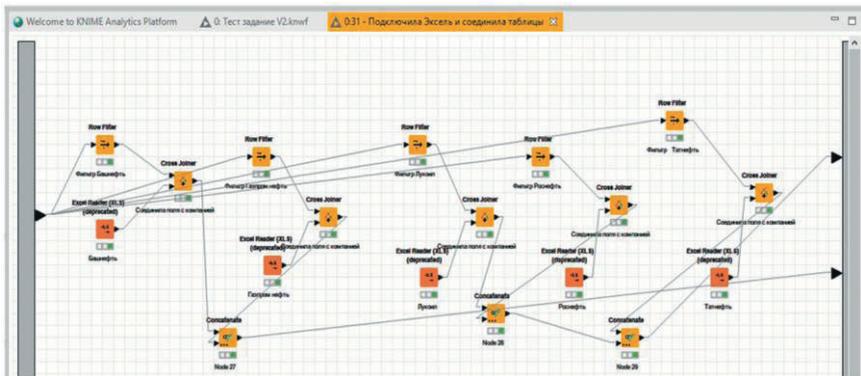


Рис. 2. Подпроцесс «Подключение таблиц исходных данных»

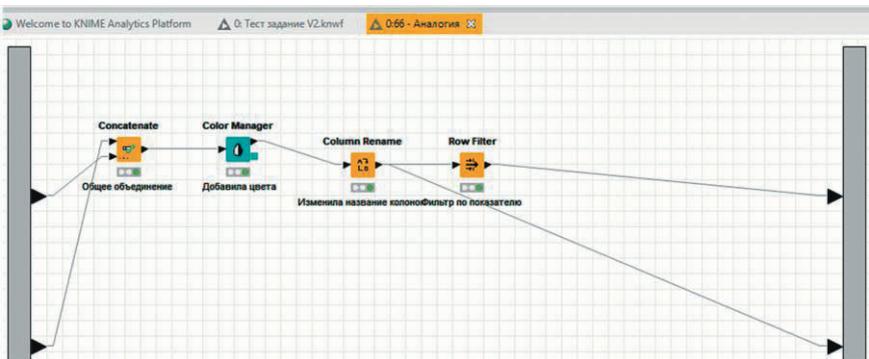


Рис. 3. Подпроцесс «Аналогия»

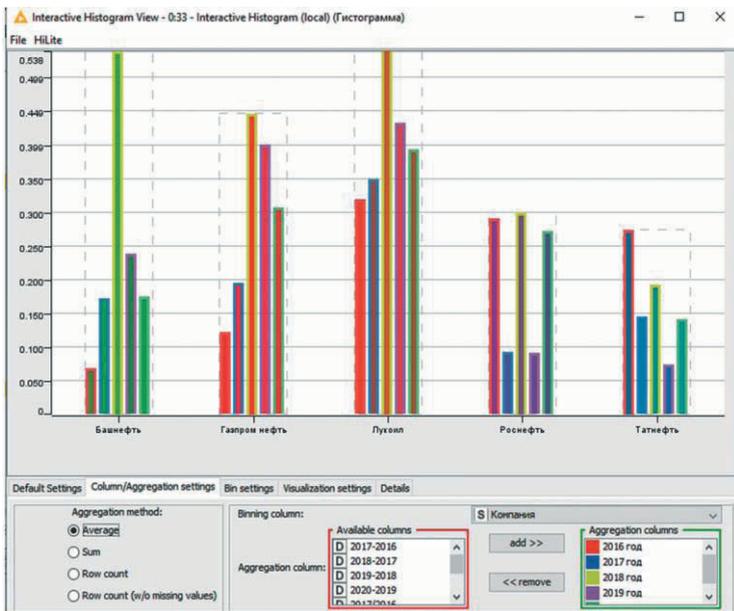


Рис. 4. Пример отображения показателей ликвидности

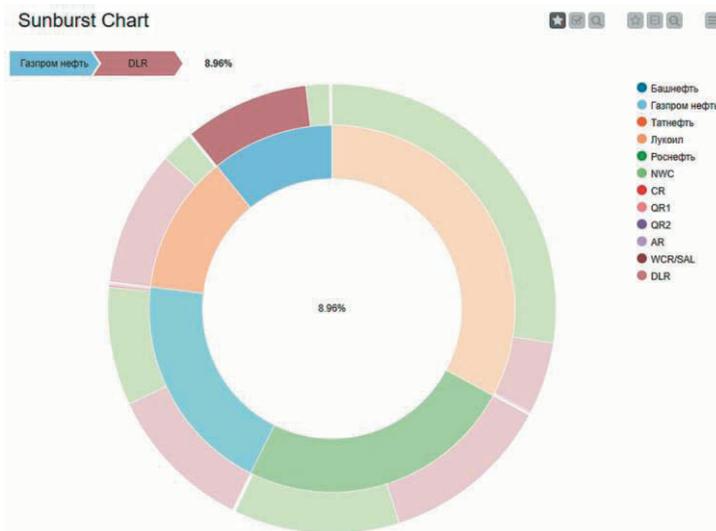


Рис. 5. Пример отображения показателей ликвидности (диаграмма солнечных лучей)

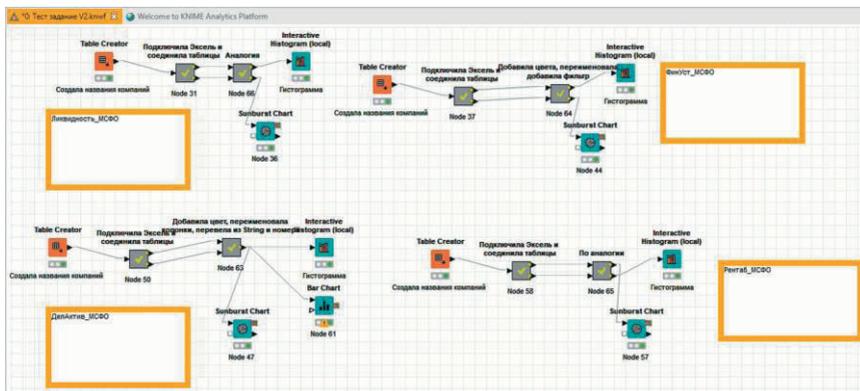


Рис. 6. Единое рабочее пространство

Такие рабочие процессы можно рассматривать как элементы оценки экономической безопасности предприятий, которые могут быть использованы государственными органами власти при оценке экономической безопасности отрасли, региона или страны, а также крупными предприятиями при оценке своего уровня экономической безопасности и проведения бенчмаркинга (процесса сравнения своей деятельности с лучшими компаниями на рынке и в отрасли).

Показатели финансовой отчетности являются единственным источником систематизированной экономической информации о бизнес-пространстве экономики. Следовательно, принятие эффективных управленческих решений на основе качественного и своевременного анализа отчетных данных нефтяных компаний обеспечит энергетическую безопасность страны и государственный контроль за использованием и оборотом национальных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Указ** Президента РФ от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации» // СПС «Консультант-Плюс».
2. **Указ** Президента РФ от 31 декабря 2015 г. № 683 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» // СПС «Консультант-Плюс».
3. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 25.06.2003 г. № 367 «Об утверждении Правил проведения арбитражным управляющим финансового анализа» // СПС «Консультант-Плюс».
4. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» // СПС «Консультант-Плюс».
5. **Положение** Банка России от 28 декабря 2017 г. № 626-П «Об оценке финансового положения, о требованиях к финансовому положению и об основаниях для

признания финансового положения неудовлетворительным учредителей (участников) кредитной организации и иных лиц, предусмотренных Федеральным законом от 29 июля 2017 г. №281-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования обязательных требований к учредителям (участникам), органам управления и должностным лицам финансовых организаций»// СПС «Консультант-Плюс».

6. **Коваленко О.А., Малютина Т.Д., Ткаченко Д.Д.** Экономическая безопасность предприятия: моделирование и оценка: учебное пособие. М.: РИОР, 2018. 359 с.
7. **Пименов Н.А.** Управление финансовыми рисками в системе экономической безопасности: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Издательство Юрайт, 2019. 326 с.
8. **Платформа KNIMEAnalytics.** Режим доступа: <https://www.knime.com/>

*М.С Карин, KarinMS@mpei.ru,
М.В. Бурмейстер, max.burmeyster@gmail.com,
Р.В. Булатов, bulatov_rv@inbox.ru,
НИУ «МЭИ», Москва*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ В ОБЛАСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ И ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Электроэнергетические системы могут функционировать в двух режимах: объединенном и изолированном. Объединенная электроэнергетическая система (ОЭС) представляет собой совокупность энергетических систем, объединенных общностью режима, и имеет общее диспетчерское управление (ДУ). Изолированные системы работают отдельно от ОЭС и не имеют с ней связей. К изолированным также относят системы, которые были подключены к сети, но в настоящий момент отключены от нее [1].

На данный момент в мире и, в частности, в России много внимания уделяют возобновляемой энергетике. Генерирующее оборудование на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) может оказывать сильное влияние на параметры электрической энергии. Например, флуктуации выходной мощности электростанций на основе ВИЭ вызывают колебания частоты в системе, при этом ее значение может выходить за допустимые пределы, что в конечном итоге может привести к системной аварии.

Важным свойством объединенной системы является то, что потеря большой мощности генерации или наброс большой мощности нагрузки не влечет за собой серьезных последствий с точки зрения отклонения частоты от ее нормативного значения. В связи с этим применение ВИЭ в таких системах не оказывает на них большого влияния.

Генерация на основе ВИЭ широко распространена в изолированных системах, так как применение ВИЭ позволяет снизить затраты на доставку топлива до удаленных точек электроснабжения, однако в изолированных системах ВИЭ оказывают существенное воздействие на параметры и качество вырабатываемой электроэнергии.

В соответствии с СТО 59012820.27.100.003—2012 [2] территория России разделена на две синхронные зоны. Первая зона содержит в себе все объединенные энергосистемы. Вторая зона включает в себя объединенную энергосистему Востока, которая работает изолированно от первой зоны. К объединенным и изолированным энергосистемам России предъявляются различные требования к отклонениям частоты от номинального значения. ГОСТ 32144—2013 [1] регламентирует соответствующие границы нормально и предельно допустимых значений отклонений частоты (как показателя качества электроэнергии) для объединенных и изолированных систем.

Нормально допустимые значения отклонения частоты для объединенных систем составляют $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени наблюдения, при этом время наблюдения составляет одну неделю. В диапазоне от 49,8 до 50,2 Гц частота может находиться неограниченное время, так как приемники потребителей рассчитаны на этот диапазон. Предельно допустимые значения отклонения частоты составляют $\pm 0,4$ Гц, нарушение этого диапазона недопустимо. В случае, если отклонение частоты происходит на величину от 0,2 до 0,4 Гц, то такая ситуация должна длиться не более 5 % времени в одну неделю (504 мин.) [1].

В изолированных электроэнергетических системах требования к отклонениям частоты менее жесткие, так как усиление негативного влияния незначительно сказывается на экономических затратах небольших энергосистем. Нормально допустимые значения отклонения частоты составляют $\pm 1,0$ Гц в течение 95 % времени наблюдения, при этом время наблюдения составляет одну неделю, а предельно допустимые — $\pm 5,0$ Гц. Таким образом, при отклонении частоты на значение от 1,0 до 5,0 Гц данное событие должно длиться не более 5 % времени в одну неделю, т.е. 504 мин [1].

При использовании в изолированных системах генерирующего оборудования на базе ветроэнергетических установок ГОСТ Р 58491—2019 регламентирует допустимую длительность работы установки без отключения от сети в диапазонах частот, где время минимальной продолжительности работы увеличивается при нарастании частоты от 46 до 49 Гц от 1 с до 5 мин и более, а время работы в диапазоне 51—55 Гц и ниже 46 Гц устанавливает завод-изготовитель [3].

Технические требования к объектам генерации на базе солнечных модулей [4] находятся на проектной стадии и в настоящий момент не утверждены. С целью ознакомительного информирования можно отметить, что в до-

кументе содержатся предписания к длительности работы солнечной электростанции без отключения от сети от 1 с до 3 мин. и более при изменении частоты от 46 до 51 Гц, а продолжительность работы при частотах от 51 до 55 Гц устанавливает завод-изготовитель [4].

Несмотря на требования [1] к отклонению частоты, ГОСТ Р 55890—2013 устанавливает более жесткие требования к поддержанию частоты [5]. В объединенных электроэнергетических системах, т.е. в первой синхронной зоне, значение частоты должно поддерживаться в пределах $50,00 \pm 0,05$ Гц, несмотря на то, что нормально допустимые значения отклонения частоты составляют, как уже отмечалось выше, $\pm 0,2$ Гц. Если частота изменяется на величину, превышающую 0,05 Гц, но находящуюся в границах нормально допустимых отклонений, то ее необходимо восстановить до уровня $50,00 \pm 0,05$ Гц за время, не превышающее 15 мин. Для изолированных систем частота должна находиться в пределах $50,0 \pm 0,2$ Гц минимум 22,8 ч в сутки [5].

При регулировании частоты с помощью автоматического вторичного регулирования требования составляют: $\pm 0,01$ Гц для первой и второй синхронных зон ЕЭС России и $\pm 0,05$ Гц — в технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах [5].

В других странах за номинальную частоту переменного тока приняты 50 Гц, однако США, Япония, Финляндия, Саудовская Аравия и большинство стран Южной Америки работают на частоте 60 Гц. В каждой стране действуют либо свои нормативные документы, либо международные. Например, институт инженеров электротехники и электроники (*IEEE*) рекомендует строгий рабочий диапазон частоты $\pm 0,036$ Гц для ОЭС [6]. Североамериканская корпорация по обеспечению надежности электроэнергетических систем (*NERC*) рекомендует запускать быстродействующую автоматическую частотную разгрузку, когда частота снижается ниже значения 59,3 Гц (при номинальной частоте 60 Гц); если частота падает ниже 57 Гц или поднимается выше 61,8 Гц, допускается отключение генератора [7]. Европейский стандарт *EN 50160* [8] устанавливает аналогичные пределы для объединенных энергосистем, подключенных к сети: нормально допустимые отклонения частоты не должны превышать $\pm 0,5$ Гц в течение 99,5 % времени наблюдения (одна неделя), а предельно допустимые не должны выходить за границы диапазона 47—52 Гц.

Для изолированных электроэнергетических систем других стран данные о предельных значениях отклонения частоты отсутствуют в открытом доступе, так как на данные значения сильно влияют тип генерации и распределение нагрузки в конкретной системе. При отсутствии точных данных общие стандарты серии *ISO 8528—5* [9] могут служить руководством для определения пределов.

Результат сравнительного анализа нормативных документов в области регулирования частоты в объединенных и изолированных электроэнергетических системах представлен в таблице.

Данное обстоятельство позволяет применять импортное оборудование, выполненное по международным стандартам, в отечественных системах. С другой стороны, более жесткие диапазоны отклонений частоты требуют дополнительных организационных мер по обеспечению работы в заданном диапазоне, больших резервов мощности и т.д.

Таблица

Требования к отклонениям частоты в объединенных и изолированных ЭЭС в Российской Федерации и зарубежных странах

Тип ЭЭС	Объединенная		Изолированная	
	РФ	Иностранный	РФ	Иностранный
Нормально допустимое отклонение частоты, Гц	$\pm 0,2$ [1]; $\pm 0,05/\pm 0,01$ [5]	$\pm 0,036$ [6]; $\pm 0,5$ [8]	$\pm 1,0$ [1, 3], $\pm 0,2/\pm 0,01$ [5]	$\pm 1,5$ [9]
Предельно допустимое отклонение частоты, Гц	$\pm 0,4$ [1]	$-3/+1,8$ [6]; $-3/+2$ [8]	$\pm 5,0$ [1], $-4/+5$ [3, 4]	$\pm 9,0$ [9]
Стандарты	[1] ГОСТ 32144; [5] ГОСТ Р 55890	[6] NERC; [8] EN50160	[1] ГОСТ 32144; [3] ГОСТ Р 58491; [5] ГОСТ Р 55890	[9] ISO Standard 8528-5

ЛИТЕРАТУРА

1. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 17 с.
2. **СТО 59012820.27.100.003—2012.** Стандарт организации. Регулирование частоты и активной мощности в ЭЭС России. Нормы и требования.
3. **ГОСТ Р 58491—2019.** Электроэнергетика. Технические требования к объектам генерации на базе ветроэнергетических установок.
4. **Проект ГОСТ Р.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Возобновляемые источники энергии. Технические требования к объектам генерации на базе фотоэлектрических солнечных модулей и их групп.
5. **ГОСТ Р 55890—2013.** Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Регулирование частоты и перетоков активной мощности.
6. **North American Electric Reliability Corporation (NERC).** Frequency Response Initiative Report: The Reliability Role of Frequency Response; NERC: Atlanta, GA, USA, 2012.

7. **Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions** / U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan et al. // Applied Sciences. 2017. 7. No 654, 2017.
8. **Markiewicz H., Klajn A.** Voltage Disturbances: Standard EN 50160—Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, 2004.
9. **ISO 8528-5:2005 Standard:** Reciprocating Internal Combustion Engine Driven Alternating Current Generating Sets — Part 5: Generating Sets, 2005.

О.В. Иваикова, k_otd@nirhtu.ru,

Л.Г. Ионова, k_enimd@nirhtu.ru,

А.С. Исаев, asisaew@nirhtu.ru,

*Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева,
г. Новомосковск*

НОВЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧАМ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Оптимальное решение — лучшее из области допустимых решений (ОДР) по какому-либо количественному критерию. В общем случае оптимизационная задача имеет вид

$$Z(X) \rightarrow \min(\max), Z \in L(X), \quad (1)$$

где X — вектор переменных; $Z(X)$ — целевая функция; $L(X)$ — множество уравнений ограничения, накладываемых на значения (свойства) переменных.

Оптимизационные задачи (математическое программирование) впервые в СССР были сформулированы в 40-е годы XX века [1], но это касалось в первую очередь организационных мероприятий — автор отмечал, что большого экономического эффекта достигнуто не было. В 80-е годы задачи оптимизации в технике стали использоваться достаточно широко [2]. Это было большим шагом вперед в проектировании, так как означало переход от качественных (экспертных) методов к количественным (количественным), что соответствует большей объективности и независимости оценок.

В настоящее время необходимо изменить подход к задачам оптимизации. Прежде всего, изменились критерии. Ранее основным был минимум приведенных затрат. Сегодня, ввиду изменения политической ситуации в стране, единых народнохозяйственных затрат нет: электроэнергия является товаром (а не услугой) со всеми свойствами, присущими рынку. Мы остановимся на математических аспектах задач оптимизации.

Развитие IT-средств и прикладного программного обеспечения привело к тому, что многие вычислительные методы, используемые в технических

системах, уже реализованы программно. Например, ранее для математического моделирования объектов электрики использовали разложение на простые сомножители натурального числа n . Для этого была необходимость в программировании (Borland Pascal). Сейчас подобное разложение можно получить в MathCAD и MatLab, используя функцию *Factor*. При этом используется тот же принцип непосредственного получения простых чисел (решето Эратосфена), но в данном случае он уже доведен до стандартной вычислительной процедуры. На рисунке 1 показано разложение натурального числа на простые сомножители с возможностью их дальнейшей обработки в виде сформированного массива (вектора). Помимо программной разработки этой операции поставлена в соответствие дефиниция. Она определена как «факторизация» (в широком смысле — декомпозиция объекта на составляющие, образующие произведение исходной функции; в частном случае — разложение натурального числа на простые сомножители) [4].

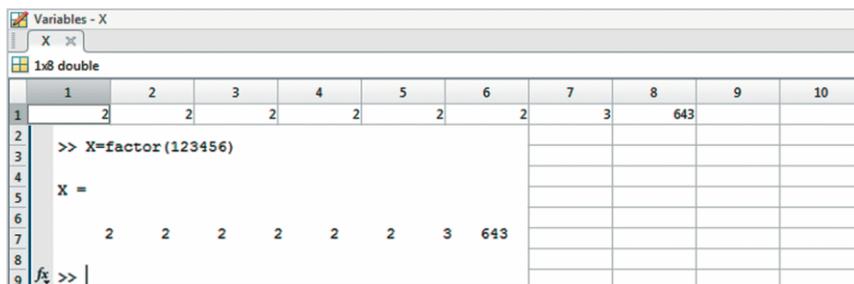


Рис. 1. Разложение на простые сомножители натурального числа (Matlab)

Современные пакеты прикладной математики позволяют решать задачи математического программирования в общем виде. Электронный процессор MS Excel при этом использует надстройку «Поиск решения» (*Solver*), MathCAD — функции поиска экстремума *Minimize/Maximize* или минимальной ошибки *Minerr*. MathCAD более нагляден, прост в использовании, может рассматриваться как «интеллектуальный калькулятор». Оптимальным по функциональным возможностям является MatLab (помимо функций, аналогичных MathCAD, он содержит библиотеки моделирования технических систем), поэтому в качестве инструментального средства нами был принят MatLab.

Рассмотрим типичную рабочую программу дисциплины [5] и пособие по методам оптимизации в электроэнергетике [6]. Прежде всего, в них преобладает изучение именно поисковых методов (они составляют не менее 80 % материала) в ущерб постановке задачи, верификации результатов, проверке

адекватности модели. Эта ситуация типична для любых задач оптимизации в технике, а не только в электроснабжении. Как правило, рассматриваются поисковые методы нулевого порядка (метод золотого сечения), первого (градиентный), второго (Ньютона), линейного программирования (симплекс-алгоритм), учета ограничений (неопределенных множителей Лагранжа). В свое время классификация методов имела смысл — при ориентации на «ручной расчет» они позволяли уменьшить трудоемкость вычислений (методы нулевого порядка, не использующие дифференцирование целевой функции) или вообще получить результат (методы второго порядка, использующие первую и вторую производную функции и гарантирующие движение в направлении оптимального решения). Сейчас изучение методов полезно в алгоритмическом плане, но не более.

Типичным примером поискового метода является метод золотого сечения. Его отличительной особенностью является разбиение интервала неопределенности золотым сечением дважды (меньшая часть относится к большей, как большая к интервалу). Эта особенность позволяет уменьшить объем расчетов, так как на каждой итерации рассчитывается только одна [согласно (2)] координата пробной точки ($X_{л}$, $X_{пр}$) и значение целевой функции в ней (для другой значения используются с предыдущей итерации):

$$X_{л}^{(K)} = A_{л}^{(K)} + \Phi_1 L^{(K)}, X_{пр}^{(K)} = A_{л}^{(K)} + \Phi_2 L^{(K)} \quad (2)$$

где Φ_1 , Φ_2 — числа Фибоначчи, L — интервал неопределенности, K — номер итерации.

При использовании средств прикладной математики это неактуально. Можно получить решение методом покоординатного изменения функции (метод Хука—Дживса) при шаге аргумента меньшем, чем заданная точность расчета. Подобная модель элементарно реализуется в табличном процессоре. Но мы рассмотрим решение в MatLab; оптимизационные функции (в общем виде, а не применительно к задачам электроэнергетики) программы подробно исследованы и изложены в [7].

Метод золотого сечения — частный случай условной оптимизации, в котором область допустимых решений задана в виде начального интервала неопределенности. В общем виде зависимость (1) сводится к виду

$$Z(X) \rightarrow \min, A < X < B. \quad (3)$$

Для решения (3) используется функция одномерной минимизации *fminbnd* ($Z(X)$, A , B). Она использует два вычислительных метода: золотого сечения и параболической интерполяции. Для примера поиска оптимального напряжения (рис. 2) программа автоматически выбрала именно метод

золотого сечения (*Procedure — golden*), при другом методе выводится другой статус алгоритма (*Procedure — Parabolic*).

```

Command Window
>> x1=0.9; %левая граница интервала неопределенности
x2=1.1; % правая граница интервала неопределенности
A1=2.2; A2=-0.7; A3=0.3; A4=-0.04; %исходные данные
fun=@(x)A1/x+A2*x.^2+A3*x.^4+A4*x.^6; %целевая функция
options = optimset('Display','iter','TolX',0.05); %погрешность
[x,fval] = fminbnd(fun,x1,x2,options)

Func-count   x             f(x)          Procedure
    1         0.976393    1.82385      initial
    2         1.02361    1.69916      golden
    3         1.05279    1.62792      golden
    4         1.07082    1.58598      golden

Optimization terminated:
the current x satisfies the termination criteria using OPTIONS.TolX of 5.000000e-02

x =

    1.0708

fval =

    1.5860

```

Рис. 2. Поиск минимума функции — условная оптимизация (MatLab)

Градиентный метод — метод первого порядка, предполагает движение в сторону оптимума в направлении градиента. В качестве примера рассмотрена задача поиска координат источника питания с целевой функцией минимума потерь (в широком смысле — поиск центра тяжести фигуры). Задача может решаться с помощью реализации градиентного метода (подробно изложено в [8]); для поиска минимума нелинейной функции многих переменных можно использовать функции *fminunc*, *fminsearch* из пакета *Toolbox Optimization*. На рисунке 3 приведено решение (линии уровня целевой функции) с реализацией градиентного метода с различным шагом.

При использовании *fminunc* в виде алгоритма можно выбрать один из трех методов: квазиньютоновский метод BFGS (Бройдена—Флетчера—Голдфарба—Шенно) или DFP (Девидона—Флетчера—Пауэлла) и метод наискорейшего спуска (steepest descent method). По умолчанию BFGS, метод наискорейшего спуска, и является градиентным методом с оптимальным шагом (рис. 3, б), поэтому результат поиска идентичен (отличие лишь в числе итераций).

Симплекс-метод представляет собой реализацию задачи линейного программирования — направленный перебор вершин области допустимых ре-

шений (в каждой новой вершине результат не хуже предыдущего). В MatLab существует пользовательская функция *linprog*. Результат ее использования приведен на рис. 4.

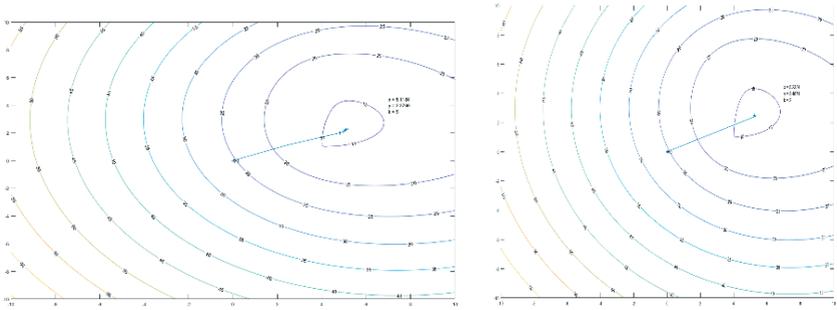


Рис. 3. Линии целевой функции при использовании градиентного метода: а — с произвольным шагом; б — с оптимальным шагом

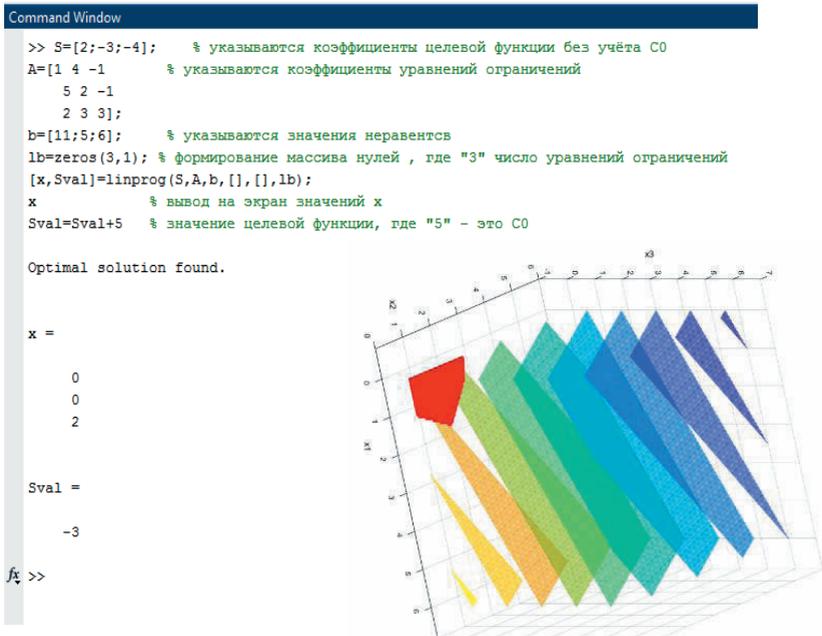


Рис. 4. Симплекс-алгоритм, реализованный функцией линейного программирования

```

>> fun = @(x) (2400-x(1)-x(2)-x(3)).^2*0.15+(800-x(1)).^2*1.3+(1300-x(2)-x(3)).^2*0.25+(500-x(2)).^2*0.7+(1100-x(3)).^2*2.6;
x0 = [0;0;0]; % ввод начальной точки
A=[-1 -1 -1; 1 1 1]; % коэффициенты уравнений ограничений
b=[0;1440];
[x] = fmincon(fun,x0,A,b)

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the value of the optimality tolerance,
and constraints are satisfied to within the value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

x =

    469.5457
     3.9943
    966.4600

fz >> |

```

Рис. 5. Поиск минимума функции с учетом ограничений в виде равенств

Для поиска минимума функции многих переменных (при наличии ограничений) предназначена функция *fmincon* из пакета *Toolbox*. Она реализует четыре метода решения задач; установлено, что на практике к решению приводит любой из них. На рисунке 5 показано решение задачи оптимального распределения мощности компенсирующих устройств при заданной их суммарной мощности.

Таким образом, все типовые оптимизационные задачи электроэнергетики (условная и безусловная оптимизация, линейное программирование) решаются с использованием функций MatLab. Программу можно рассматривать как мощный вычислительный инструмент. Кроме того, создается информационная основа для построения новых моделей и методов. Это направление видится в решении оптимизационных задач с использованием новых критериев (а не только минимум затрат или потерь мощности). Например, в случае задания нагрузок постоянной мощностью вместо рекуррентных моделей и итерационных расчетов (методы Гаусса, Зейделя) при расчете параметров режима можно построить модель, минимизирующую невязку решения СЛАУ (систем линейных уравнений); минимизировать дисперсию или сумму модулей отклонений в задачах прогнозирования и аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л: Изд. ЛГУ, 1939. 67 с.
2. Дегтярев Ю.И. Методы оптимизации. М.: Советское радио, 1980. 272 с.
3. Жичкин С.В., Исаев А.С. Гипотезы моделирования структуры техноценозов простыми числами: Материалы V международной научн. конф. по философии техники и технетике. Вып. 12. «Ценологические исследования». М.: Центр системных исследований, 2000. С. 191—198.

4. **Официальный сайт «MathWorks»** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/symbolic/factor.html> (дата обращения: 28.05.2021).
5. **Официальный сайт НИ РХТУ. РПД «Оптимизация систем электроснабжения»**. [Электронный ресурс]. URL: <https://moodle.nirhtu.ru/enrol/index.php?id=966> (дата обращения: 28.05.2021).
6. **Федуец Н.И., Черников Ю.Г.** Методы оптимизации. М.: Изд-во МГГУ, 2009. 375 с.
7. **Гольдштейн А.Л.** Оптимизация в среде MatLab. Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл.-политехн. ун-та, 2015. 192 с.
8. **Гершкович Ю.Б., Широков К.А.** Применение пакета «MATLAB» для решения нелинейных задач оптимизации градиентными методами. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2009. 32 с.

*М.Г. Ошурков, oshurkovm@mail.ru,
Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева,
г. Новомосковск*

СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ТЕРМИНОВ ЭЛЕКТРИКИ

В обучении электроснабжению выделяют два подхода: первый ориентирован на потребителей (вниз от границы раздела «предприятие—субъект электроэнергетики»), изучающий все вопросы электроснабжения, преобразования, использования электроэнергии, электросбережения [1]; второй ориентирован на субъектов электроэнергетики, осуществляющих деятельность в сфере электроэнергетики и объективно сосредоточенных на производстве электрической энергии, ее поставке (продаже), электроснабжении до границ ответственности субъекта электроэнергетики перед потребителем (до шестого уровня БУР системы электроснабжения промышленных предприятий), предоставлении услуг по передаче электроэнергии, оперативно-диспетчерском управлении в электроэнергетике, организации купли-продажи электрической энергии.

Наличие двух подходов (что отражается и в различии терминологии) означает: 1) становление электрического хозяйства — нового объекта создания, исследования, управления; 2) дифференциацию наук и терминологии (особенно когда стала формироваться электрика — наука об электрическом хозяйстве потребителей, о специфике построения и функционирования электрической составляющей потребления) и специализацию результатов; 3) проявление техноценологических (фрактальных, синергетических) свойств самоорганизации электрического хозяйства и рост междисциплинарных исследований.

Ядро словаря электрики составляют термины, формально выделяемые на основе анализа видового H -распределения терминов глобального (составленного по всей совокупности проанализированных текстов) словаря как виды, расположенные в окрестности точки \mathcal{R} (рис. 1 и 2). Параметр \mathcal{R} соответствует значению аргумента поинтер-точки видового распределения, делящей его на две характерные части. При $x < \mathcal{R}$ $W(x) > 1$, при $x > \mathcal{R}$ $W(x) \equiv 1$ (соответствует кастам массовых видов). Значение \mathcal{R} позволяет судить о степени разнообразия структуры системы, состоящей из N единиц. Для полученного объема глобального текста — это касты, объединяющие виды терминов со встречаемостью по 350—400 раз. Конечно, нечеткость границ не позволяет удовлетвориться лишь формализованными процедурами выделения терминологии, которые, облегчая задачу, все же не позволяют принять окончательное решение без экспертной оценки. Приведем часть подмножества формально выделяемых терминов (примерно 5 % ядра словаря и 0,5 % общего словаря электрики).

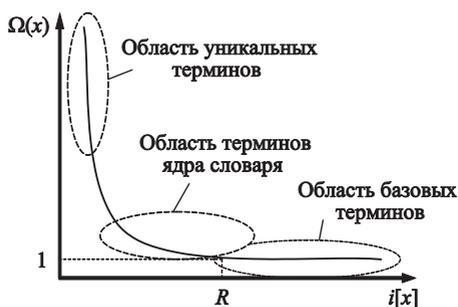


Рис. 1. Области терминов на кривой видового распределения

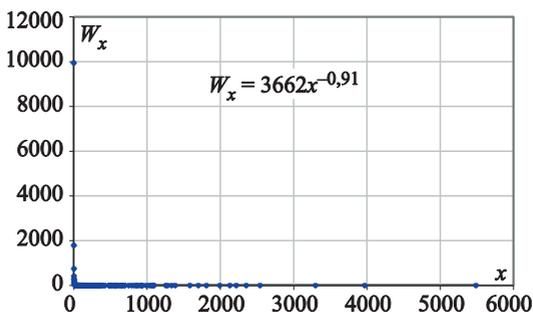


Рис. 2. Видовое распределения терминов глобального текста

Автоматический выключатель, Автотрансформатор, Вентиляция, Высоковольтный выключатель, ГПП, Документация, Допуск, Допускаемый, Дуга, Ёмкость батареи конденсаторов, Заземленный корпус электрооборудования, Заземляющий контур, Зануляемая часть электроустановки, Инструкция, Источник питания, Катушка максимального тока автоматического выключателя, Коммутационный узел, Контактный мост, Короткое замыкание, Корпус аппарата, КТП, Магистральный шинопровод, Масляный выключатель, Мгновенное значение тока, Молниеприемник, Монтаж кабельной линии, Нагрев обмотки, Неизолированный шинопровод, Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора напряжения, Номинальный ток выключателя, Осветительная цепь, Открытая конструкция шинопровода, Переключение электрической цепи, Переносной вольтметр постоянного тока, Подключение объекта, Показание счетчика электроэнергии, Потребление реактивной энергии, Проектирование генерального плана предприятия, Производительность электротехнического персонала, Производственная деятельность, Промежуточное реле, Пусковой ток, Пятистержневой трансформатор напряжения, Размыкание контакта, Распределительное устройство, Реактивная мощность линии, РПН, Самозапуск электродвигателя, Система автоматизированного проектирования, Система электроснабжения сталеплавильной печи, Снятие счетчика, Стационарное средство электрического измерения, Тарифная зона суток, Тепловой расцепитель, Трансформатор электрической печи, Трасса кабельной линии, Трасса линии, Тяговая подстанция, Узел нагрузки энергосистемы, Указательное реле, Устойчивость структуры электрохозяйства, Фазовое регулирование, Электрическая сеть, Электровоздуходувка, Электродвигатель станка, Электромагнитный прибор, Электроремонтная мастерская, Электротехнический персонал предприятия, Электротех, Энергетический надзор.

После выделения терминологии (словника) давали определения терминам. Определения терминов математики, физики, ТОО, экономики и других областей брали из соответствующих источников без изменения. Определения терминов граничных областей (электроэнергетика, электропривод, электротермия) брали из ГОСТ и учебной литературы с максимальным сохранением текста источника, однако в некоторых случаях приходилось сужать или расширять определение применительно к специфике и объему использования того или иного понятия специалистами электрики.

С учетом этого составлены определения, которые для специфических терминов электрики могут отличаться от традиционных. Многие понятия ранее вообще не рассматривались как термины, и для них не было определений в нормативно-справочной и учебной литературе. Анализ характеристик *H*-распределений слов в исследованных текстах, показателя встречаемости слов и словосочетаний привел к необходимости присвоения статуса

термина многим словам и словосочетаниям и потребовал формулировки их определений.

Разнообразие сфер практической деятельности специалистов электрики и необходимость корректировки учебных программ в вузах определили необходимость структуризации терминологии (см. таблицу).

Таблица

Терминология электрики по направлениям (фрагмент)

Философско-мировоззренческая	Математическая	Проектирование	Эксплуатация	Менеджмент
Ассортица; Вариофикация; Документ; Документальный отбор; Изделие; Интеллектуальный отбор; Информационный отбор; Научная картина мира; Самоорганизация технологическая	Алгоритм; База данных (банк данных); Видовое <i>H</i> -распределение; Ранг; Ранговое <i>H</i> -распределение; Ранговое <i>H</i> -распределение по параметру (параметрическое ранговое распределение); Каста; Каста саранчевая	Авторский надзор; Баланс; Валовый расход воды; Вид деятельности; Вид продукции; Вспомогательное оборудование; Вторичный энергоресурс; Выброс; Генеральный план; Главный инженер проекта; Граница проектирования; Договор подряда; Документ; Документация; Завод; Заказчик	Безотказность; Бесперебойность; Беспростойный ремонт; Бригада (по наряду или распоряжению); Внешнее электроснабжение; Внутрицеховая подстанция; Вспомогательная цепь подстанции; Габаритный пролет Грузоподъемные машины; Действующая электроустановка;	Балансовая прибыль; Вынужденный режим; Главный электрик; Граница ответственности за качество электрической энергии; График нагрузок; Группа точек поставки; Двухставочный тариф; Коммерческий учет; Конкурентный отбор ценовых заявок

Термины электрики для инженеров выделяли из подмножества терминов в окрестностях точки \mathcal{R} видового распределения глобального текста. Словарь инженера содержит около 2000 статей. Определения к терминам формировались на основе анализа текстов базовых учебников по специальности «Электроснабжение», нормативной и справочной литературы, охватывающей проектирование и эксплуатацию электрической части промышленных объектов. Так как материалы учебников, в большинстве своем написанных учеными классической школы электротехники, не содержат вопросы проектирования и эксплуатации электрохозяйства, отношений с энергосистемой, с которыми сталкиваются инженеры-практики промышленных предприятий, нами проанализирована рабочая документация отдела главного энергетика и электроцеха крупного металлургического и химического комбинатов, включающая более 100 инструкций, договоры и переписку с внешними организациями.

Термины для 1УР—3УР системы электроснабжения, брали из текстов практически без изменения, а терминология ценологического подхода к проектированию и анализу техноценозов [2] сформулирована впервые.

Стало очевидным, что знание основ менеджмента необходимо специалисту-электрику, проектирующему, создающему, эксплуатирующему оборудование, планирующему перспективу и ставящему своей целью повышение эффективности электрического хозяйства [3].

Мир стал иным. Лишь малую часть описывают классические науки, которые основной акцент делают на законы, не зависящие от времени. Руководствоваться нужно новыми ценологическими взглядами, которые предлагают новые критерии оценки эффективности принимаемых управленческих решений после выполнения классических и вероятностно-статистических расчетов. Все это требует и кардинального изменения мировоззрения профессионалов-электриков, так как создаваемые и эксплуатируемые ими электрооборудование, установки и сети, рассчитываемые и реализуемые электрические режимы и электротехнологические процессы осуществляются в рамках первой научной картины мира с гауссовым разбросом.

Для потребителей ценологическая теория дает:

— *методы расчета* параметров электропотребления на различных стадиях проектных, договорных, инвестиционных решений; границы применения расчетных электрических нагрузок, нормирования и лимитирования расхода электроэнергии, основанных на отдельных электроприемниках или единицах технологического и иного оборудования;

— *основу определения* параметров энергосбережения при сохраняемой действующей технологии и энергоэффективности при внедрении новых технологических процессов и модернизации;

— *методику сравнения* цехов, производств, предприятий по величине эффективности функционирования электрического хозяйства и его частей, включая оценку энергосбережения;

— *возможность кардинально изменить систему* планово-предупредительного ремонта, отказавшись от техосмотра и обслуживания «саранчи»;

— *новые основания* для планирования, эксплуатации электрооборудования и сетей;

— *возможность* на новых принципах организации перестроить работу электроремонтных цехов для централизованного заводского и регионального ремонтов; методику расчета заказа нового оборудования и потребности в запасных частях, комплектующих, изоляционных материалах, обмоточном проводе.

Эффективность работы станет значительнее и яснее менеджеру-электрику, если будет определено ценологическое место конкретной организации в ряду

однородных объектов: по продукции — в рамках отрасли, по величине электропотребления — в рамках региона, по экономическим, социальным и другим показателям — в рамках соответствующего техноценоза.

Любой инженер становится менеджером, потому что наряду с эксплуатацией техники он начинает руководить персоналом, заниматься материально-техническим, энергетическим, финансовым и другим обеспечением. Поэтому проанализированы также тексты по энергоменеджменту, энергосбережению и энергоаудиту, авторефераты диссертаций.

Особый вопрос — целесообразность включения в словарь профессионального жаргона. Не будучи закрепленными в нормативной литературе, жаргонные слова и выражения практически однозначно понимаются профессионалами и быстро усваиваются студентами. Прочно вошли в лексикон электриков слова-термины: максималка — максимальная токовая защита; масляник, воздушник — выключатели; воздушка — воздушная ЛЭП обычно напряжением до 10 кВ; тысячник — трансформатор с высшим напряжением 6—10 кВ; гасить — отключать электроустановку безаварийно с соблюдением технологического регламента; вторичка — оперативные цепи с относящимися к ним элементами.

Подготовка научных кадров высшей квалификации в области электрики соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы. Мы выделили три крупных области в науке об электричестве: электротехнику, электроэнергетику, электрику. Номенклатура специальностей научных работников по шифрам, соответствующим этим областям: 05.09.01 — Электромеханика и электрические аппараты; 05.14.02 — Электростанции и электроэнергетические системы; 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы. Этим областям соответствует своя, специфическая терминология, имеющая, естественно, области пересечения с терминологией «смежных» областей.

Формула специальности 05.09.01 объединяет «исследования по физическим и техническим принципам создания и совершенствования силовых и информационных устройств для взаимного преобразования электрической и механической энергии, электрических, контактных и бесконтактных аппаратов для коммутации электрических цепей и управления потоками энергии». Специальность ориентирована, в конечном счете, на разработку электротехнических изделий. Эта специальность включает в себя этап НИОКР, конструкторское и технологическое обеспечение процессов изготовления электротехнических изделий, сертификацию и контроль готовой продукции, что обеспечивает материальную и информационную основу создания электротехнических комплексов — электрохозяйства потребителей электротехнической продукции и электроэнергетики. Специальность не занимается оптимизацией режимных параметров и систем, укомплектован-

ных электрическими, электромеханическими преобразователями и электрическими аппаратами — она разрабатывает электротехнические изделия, которые используют электроэнергетику и электрика для создания из них систем разного уровня сложности, в том числе техноценозов.

Эффективность построения и функционирования техноценоза определяется деятельностью представителей специальности 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы, предусматривающей исследования «по общим закономерностям преобразования, накопления, передачи и использования электрической энергии и электротехнической информации, а также принципы и средства управления объектами, определяющие функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного, бытового и специального назначения. В рамках научной специальности объектами изучения являются электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, электропривода, электроснабжения, электрооборудования, электро-технологии и ремонта промышленных и сельскохозяйственных предприятий и организаций, транспортных средств, аэрокосмической техники, морских и речных судов, служебных и жилых зданий, специальной техники.

Электротехнические комплексы и системы являются неотъемлемыми составными частями систем более высокого уровня (или могут рассматриваться как самостоятельные технологические комплексы) и должны обеспечивать эффективное и безопасное функционирование этих систем в широком диапазоне внешних воздействий». Для этого специальность 05.09.03 в соответствии с паспортом должна:

1) развивать общую теорию электротехнических комплексов и систем, изучать системные свойства и связи, осуществлять физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем;

2) обосновывать технические, технологические, экономические, экологические и социальные критерии оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем;

3) осуществлять их структурный и параметрический синтез, оптимизируя и алгоритмически эффективно управляя ими;

4) обеспечивать работоспособность и качество функционирования в различных режимах и при разнообразных внешних воздействиях;

5) разрабатывать методы и приемы безопасной и эффективной эксплуатации, утилизации и ликвидации отдельных составляющих электрического хозяйства.

Специальность 05.09.03 не занимается отдельными самостоятельными объектами (изделиями), если они не часть системы, где такой объект «при-

вязан» во времени, пространстве, технологии, в системах электроснабжения, обеспечения другими энергетическими, материальными и информационными ресурсами.

Научное обеспечение электроэнергетики лежит на специальности 05.14.02 — Электростанции и электроэнергетические системы, которая объединяет «исследования по связям и закономерностям при планировании развития, проектирования и эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей и систем электроснабжения. В рамках специальности проводят исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества».

Приведенная формула специальности относится к субъектам электроэнергетики. При сооружении крупного потребителя за специальностью 05.14.02 остаются вопросы о генерирующих мощностях (электростанциях); разработки методов расчета, прогнозирования, оптимизации и координации уровня токов КЗ в сетях энергосистем; оценки надежности электрооборудования, структурных схем и схем РУ питающих сетей; проведение на основе методов математического и физического моделирования в электроэнергетике расчетов установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электрической системы АО-энерго; выполнение анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики, релейной защиты в электроэнергетике для последующего формирования технических условий при технологическом присоединении потребителей. Отделы перспективного развития энергосистем и институты, обеспечивающие научную и проектную составляющую электроэнергетики (например, Энергосетьпроект), при подключении каждого крупного потребителя решают вопросы его электроснабжения (прорабатывают возможности его подключения). Развитие Единой энергосистемы страны и каждой региональной ее части на стыке «субъект электроэнергетики—потребитель» требует квалифицированных решений, где определяющее место принадлежит субъектам электроэнергетики.

Электрика, таким образом — особая научная область, которая (с развитием ценологического подхода) стала активно привлекать области математики и естествознания, ранее не использовавшиеся наукой об электричестве. Термины «энтропия», «кластерный анализ» (и все понятия, к нему относящиеся), «нейронные сети», «фрактальность», «негауссовы распределения» и др. вошли в практику электрики. Таким образом, в настоящее время назрела необходимость в выделении подсловаря научных терминов электрики, который окончательно завершит оформление электрики как науки и области ее практической деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудрин Б.И., Цырук С.А.** Техноценологические основания науки об электрическом хозяйстве потребителей электротехнической продукции и электрической энергии и мощности: Монография. Вып. 55. «Ценологические исследования». М.: Технетика, 2015. 293 с.
2. **Лагуткин О.Е., Ошурков М.Г.** Программное обеспечение принятия решений на предпроектных стадиях в комплексном технологическом институте // Межотр. науч.-тех. сб. Техника, экономика. Сер. Автоматизация проектирования. Вып. 1. 1995. С. 44—50.
3. **Матюнина Ю.В.** Классики менеджмента и электроменеджмент // Электрика. 2001. № 4. С. 39—44.

*Д.Г. Чурагулов, danis.ch.g@mail.ru,
И.В. Прахов, priwan@yandex.ru,
Р.И. Сакаев, rauzen1@yandex.ru @gmail.com,
ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Салават*

ПРОГРАММА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ ДИАГНОСТИКИ

На предприятиях нефтегазовой отрасли доля машинных агрегатов составляет порядка 35 % всего оборудования, используемого для ведения технологических процессов. Соответственно и основная доля отказов оборудования предприятий нефтегазовой отрасли приходится на машинные агрегаты. Их работоспособность во многом определяет надежность всего технологического комплекса. Лидером по повреждаемости среди машинных агрегатов нефтегазовой отрасли являются вентиляторное оборудование и насосно-компрессорное оборудование. Для обеспечения необходимого уровня надежности машинных агрегатов необходимо использовать современные методы, средства и системы диагностики.

В настоящее время актуальным остается вопрос обеспечения необходимого уровня надежности машинных агрегатов на основе использования современных методов, средств и систем диагностики. Система технической диагностики должна включать в себя регулярный мониторинг технического состояния машинных агрегатов, включенных в единую базу данных (БД), поиск дефектов, повреждений, определение степени опасности дефектов, оценку остаточного ресурса оборудования и формирование отчетов с указанием перечня профилактических работ [1, 2].

В последнее время широкое развитие получили методы диагностики состояния машинных агрегатов с электрическим приводом, основанные на мониторинге потребляемого тока с последующим спектральным анализом полученного сигнала.

Электромагнитный спектральный метод диагностики основан на анализе взаимосвязи генерируемых двигателем электропривода параметров высших гармоник токов с техническим состоянием и режимами работы оборудования [3]. В отличие от других методов диагностики спектральный метод позволяет определять как механические, так и электрические повреждения машинных агрегатов, осуществлять удаленный контроль технического состояния оборудования, поэтому этот метод может быть положен в основу перевода на эксплуатацию по техническому состоянию. Данный метод обладает рядом преимуществ и в наибольшей степени отвечает критериям точности, эффективности и простоты инструмента диагностики состояния оборудования. Изменения режимов работы и технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом отражаются в изменении спектрального состава и динамики генерируемых двигателем электропривода высших гармонических составляющих (ВГС) токов и напряжений. Степень искажения формы кривых токов и напряжений гармоническими составляющими оценивается коэффициентом искажения синусоидальности кривой тока K_I и напряжения K_U . Параметры ВГС — амплитуда, фаза, частота, сдвиг по фазе между соответствующими гармониками токов и напряжений и сдвиг по фазе относительно основной гармоники содержат информацию о техническом состоянии оборудования и режимах работы.

По уровню автоматизации различают экспертные и автоматические системы диагностики. В первом случае решение о техническом состоянии объекта принимает человек (эксперт) на основе результирующего отчета, во втором — техническая система, как правило, компьютерная программа.

В настоящий момент решение задач диагностики электродвигателей машинных агрегатов невозможно без применения персональных компьютеров и соответствующего программного обеспечения

В настоящее время на российском рынке нет полноценного программного средства диагностики электродвигателя машинного агрегата методом спектрального анализа ВГС тока и напряжения, позволяющего выполнять ведение БД эталонного оборудования; проведение оценки текущего состояния агрегата; определение его дефектов; остаточного ресурса и формирование результирующих отчетов [3].

В общем случае диагностика выполняется с поэтапным использованием нескольких программных продуктов:

— MetrekMI 2885 для снятия параметров ВГС токов и напряжений и проведения первичной математической обработки;

— «Оценка технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом» (разработанная на кафедре ЭАПП филиала ФГБОУ ВПО «УГНТУ» в г. Салават) для обработки экспериментальных и диагностических данных и последующей выдачи заключения о техническом состоянии электродвигателя;

— MS Excel 2016 для проведения промежуточной математической обработки и графического представления результатов диагностики.

На кафедре ЭАПП филиала ФГБОУ ВПО «УГНТУ» в г. Салават разработан учебно-исследовательский комплекс для исследования взаимосвязи параметров высших гармоник токов и напряжений двигателей электропривода с техническим состоянием машинных агрегатов. Комплекс содержит анализатор спектра гармоник токов и напряжений в комплекте с трехфазными измерительными преобразователями тока и напряжения и персональный компьютер типа ноутбук со специально разработанным программным обеспечением [4—6]. На рисунке 1 представлена структурная схема комплекса.

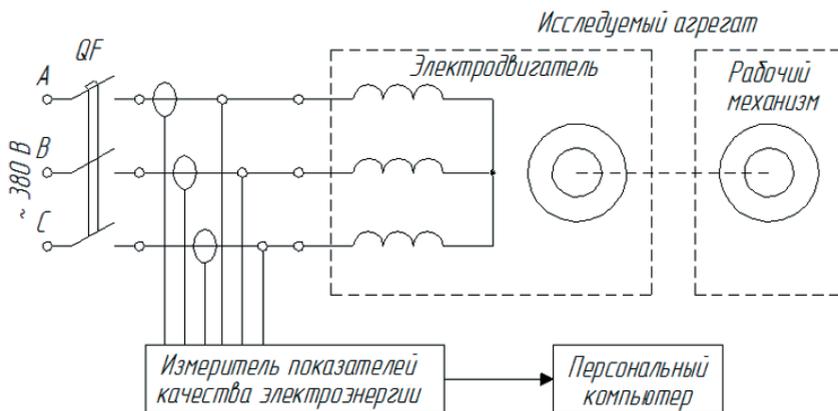


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса

В качестве анализатора спектра гармоник токов и напряжений использован прибор РЕСУРС-UF2М — измеритель показателей качества электроэнергии.

Для обработки диагностических данных используется программа «Оценка технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом», разработанная на кафедре ЭАПП филиала ФГБОУ ВО Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Салават [7].

Программное обеспечение реализовано в среде C#. Интерфейс программы состоит из трех основных частей: подготовка, обучение нейросети и обработка диагностической информации [4]. Окно программы представлены на рис. 2 и 3.

Вкладка «Подготовка» включает в себя: ввод паспортных данных двигателя, выбор типа двигателя из базы данных, получение коэффициентов гармоник тока и напряжения для исходного и предельного состояния двигателя.

Во вкладку «Обучение нейросети» входит: выбор метода обучения нейросети, выбор данных для обучения (экспериментальные данные, данные, полученные на основе математической модели электродвигателя для исходного и предельного состояния), количество циклов обучения, выбор слоев нейросети и т.д.

Вкладка «Диагностика» включает в себя: загрузку данных с прибора РЕСУРС-UF2М, загрузку нейросети, лепестковую диаграмму, диагностическую информацию (дефекты, степень поврежденности и др.).

Процедура диагностирования электродвигателя состоит из следующих этапов: 1 — измерение фазных токов и напряжений электродвигателя; 2 — разложение токов и напряжений в ряд Фурье; 3 — фильтрация высших гармонических составляющих, поступающих в двигатель из сети; 4 — анализ высших гармонических составляющих с использованием нейросети; 5 — выдача результатов о техническом состоянии электродвигателя.

Программно-аппаратный комплекс позволяет без вывода оборудования из работы проводить оценку ресурса безопасной эксплуатации машинных и выявлять неисправности на ранней стадии их развития, проводить мониторинг технического состояния оборудования [8].

Разработанный учебно-исследовательский комплекс предназначен для использования в учебном процессе при подготовке магистров по программам «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем» и «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», при изучении дисциплин «Современные проблемы развития науки, техники и технологии (в электро- и теплоэнергетике)», «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения», «Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики электрических сетей», «Активно-адаптивные электрические сети», «Цифровые технологии в электроэнергетике» и демонстрации возможностей электромагнитного спектрального метода диагностики машинных агрегатов с электрическим приводом специалистам по эксплуатации и диагностике машинных агрегатов предприятий энергетики и нефтегазового производства.



Рис. 2. Окно программы «Данные до фильтрации»

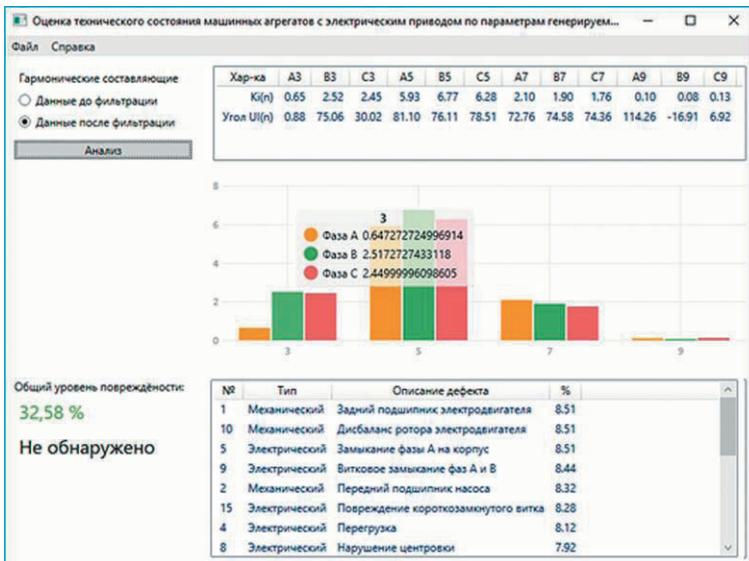


Рис. 3. Окно программы «Заключение»

Проект «Разработка учебно-исследовательского комплекса «Исследование взаимосвязи параметров высших гармоник токов и напряжений двигателей электропривода с техническим состоянием машинных агрегатов» реализован при поддержке внутривузовского гранта «Лидер УГНТУ — 2021. Инновации в образовании».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баширов М.Г., Прахов И.В.** Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. № 3. С. 7—14.
2. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г.** Интеллектуальная система управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов нефтегазового производства с электрическим приводом // Промышленная энергетика. 2019. № 6. С. 32—41.
3. **Программное средство диагностики электродвигателя машинного агрегата методом спектрального анализа высших гармонических составляющих тока и напряжения / М.Г. Баширов, Д.Г. Чурагулов, В.Н. Филиппов, Э.М. Насыров // Кибернетика и программирование. 2015. № 6. С. 6—20. DOI: 10.7256/2306-4196.2015.6.17625. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_17625.html**
4. **Способ диагностики механизмов и систем с электрическим приводом: патент на изобретение RU 2431152 С2 / И.Г. Кузеев, М.Г. Баширов, И.В. Прахов, Э.М. Баширова, А.В. Самородов. Заявл. 23.11.09, опубл. 10.10.11. Бюл. № 28.**
5. **Диагностика взрывозащищенных агрегатов по значениям параметров гармонических составляющих токов и напряжений электропривода / М.Г. Баширов, И.Г. Кузеев, А.В. Самородов, И.В. Прахов, Д.Г. Чурагулов, А.Г. Абдуллин. Св-во о госрегистрации программы для ЭВМ № 2012661419. Дата регистрации 14.12.2021.**
6. **Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом / А.В. Самородов, М.Г. Баширов, Д.Г. Чурагулов, А.А. Абдуллин // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 10—20.**
7. **Оценка технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом / М.Г. Баширов, И.В. Прахов, А.В. Самородов, И.С. Миронова, Д.Г. Чурагулов, У.Ф. Юмагузин, А.М. Хафизов, Р.А. Камалетдинов. Св-во о госрегистрации программы для ЭВМ № 2014614081. Дата регистрации 15.04.2014.**
8. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Шлейников И.С.** Экспериментальные исследования взаимосвязи параметров гармонических составляющих токов и напряжений двигателя электропривода с техническим состоянием и режимами работы агрегата для создания базы данных частотных моделей / Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: Материалы II всероссийской научно-практической конференции. 2020. Т. 2. С. 13—18.

*М.Г. Баширов, eapp@yandex.ru,
Д.Г. Чурагулов, danis.ch.g@mail.ru,
Р.П. Евдокимов, Evdokimovroman253@gmail.com,
ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Салават*

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МАШИННЫХ АГРЕГАТОВ

Машинные агрегаты с электрическим приводом (насосы, компрессоры, вентиляторы, воздуходувки, мешалки) состоят из большого количества электрических и механических элементов, являются сложными объектами с точки зрения оценки технического состояния, прогнозирования ресурса и поддержания в исправном техническом состоянии. Неисправность любого элемента агрегата может привести к его отказу. Для повышения надежности и безопасности машинных агрегатов на передовых отечественных и зарубежных производствах внедряют АСУ техническим состоянием оборудования (ТООиР), в состав которых входят системы автоматической диагностики, позволяющие поднять на новый уровень эффективность диагностического и технического обслуживания и ремонта. Все существующие на сегодняшний день отечественные и зарубежные системы автоматической диагностики машинных агрегатов основаны на использовании метода вибрационной диагностики. В качестве датчиков вибрации, аппаратных и программных средств обработки параметров вибрации в основном используют продукцию признанного лидера в области вибрационной диагностики — американской компании BentlyNevada [1, 2].

Кафедра «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» длительное время занимается исследованиями в области диагностики машинных агрегатов с электрическим приводом на основе анализа параметров высших гармоник токов и напряжений электродвигателя. Разработаны новые методы повышения чувствительности и информативности этих методов, идентификации технического состояния и режимов работы машинных агрегатов с использованием искусственных нейронных сетей. В частности, для повышения чувствительности и информативности электромагнитного спектрального метода предложено использование частотных моделей машинных агрегатов. Данные решения заинтересовали специалистов по эксплуатации и диагностике машинных агрегатов таких крупных потенциальных потребителей этой техники как ПАО «Газпром» и ПАО «НК Роснефть». Но они хотят видеть не просто идею и подтверждающий ее лабораторный макет, а максимально приближенное к практическому применению

устройство, все возможности которого можно было бы наглядно продемонстрировать.

Электромагнитный спектральный метод существенно снижает требования к характеристикам, параметрам, количеству и месту установки сенсоров. Это позволяет радикально уменьшить стоимость системы в целом и, имея ряд существенных преимуществ перед вибрационным методом, в условиях действия экономических санкций может по программе импортозамещения успешно заменить вибрационный метод диагностики машинных агрегатов, позволит не только отказаться от зарубежных аналогов, но и поставлять их на внешний рынок.

Суть электромагнитного спектрального метода диагностики машинных агрегатов заключается в том, что оценка технического состояния оборудования осуществляется путем измерения и анализа (с использованием искусственных нейронных сетей) параметров гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем электропривода, при этом двигатель выступает и как объект диагностики наравне с рабочим механизмом агрегата, и как высокочувствительный датчик, воспринимающий все изменения в техническом состоянии и режимах работы всего агрегата.

В отличие от вибрационного метода данный метод не требует установки датчиков на корпусе агрегата: достаточно в распределительной подстанции подключить стандартные измерительные датчики тока и напряжения к проводам, питающим диагностируемый агрегат. В остальном организация и функционирование системы на основе электромагнитного спектрального метода диагностики совпадает с организацией и функционированием автоматической вибрационной системы. Предлагаемая система может быть использована совместно с уже функционирующими системами виброзащиты и вибромониторинга [3, 4].

Системы автоматической диагностики — это новое поколение систем непрерывной диагностики состояния машинных агрегатов, которые выявляют неисправности, идентифицируют их и автоматически дают консультацию обслуживающему персоналу по устранению неисправности, при минимальном участии в процессе специалистов по диагностике. Все существующие на сегодняшний день системы автоматической диагностики машинных агрегатов основаны на автоматическом отслеживании изменения параметров вибраций, смещений, скорости, температуры отдельных элементов агрегата, а также параметров технологических процессов, в которых задействованы эти агрегаты [4].

Проведенные исследования показали эффективность и целесообразность использования в автоматических системах диагностики машинных агрегатов в качестве основных диагностических показателей параметров гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых двигателем элект-

ропривода. Информация о техническом состоянии машинных агрегатов из автоматической системы диагностики поступает в интеллектуальную систему управления техническим состоянием, энергетической эффективностью и безопасностью эксплуатации машинных агрегатов [5].

Двигатель электропривода машинного агрегата можно рассматривать как высокочувствительный электромагнитный активный датчик, преобразующий все изменения технического состояния как самогo электродвигателя, так и всех остальных элементов машинного агрегата в параметры генерируемых высших гармонических составляющих фазных токов и напряжений. Для моделирования электромагнитного поля двигателя электропривода машинного агрегата применяют программу ANSYS Maxwell со встроенной функцией CreateMaxwellDesign в ANSYS RMXprt. В ANSYS Maxwell помимо магнитного векторного потенциала есть возможность отображения напряженности магнитного поля, вектора магнитной индукции и плотности тока, а также вывода различных графиков, среди которых индуцированные в обмотках напряжение и ток, различные виды потерь, график скорости и т.д. [2].

В компьютер учебно-исследовательского комплекса поступают результаты параллельных измерений параметров гармоник фазных токов и напряжений двигателя электропривода, специальная программа рассчитывает средние значения результатов измерений, отфильтровывает помехи, поступающие из сети, определяет уровень поврежденности электрической машины по значениям диагностических параметров. Далее искусственной нейронной сетью с использованием программных продуктов «Оценка технического состояния электрооборудования на основе интегральных параметров» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012615158) и «Диагностика взрывозащищенных агрегатов по значениям параметров гармонических составляющих токов и напряжений электропривода» формируется интегральный критерий для оценки технического состояния агрегата [6—8].

Алгоритм (рис. 1) идентификации технического состояния машинного агрегата основан на использовании значения интегрального критерия I . Работа алгоритма следующая: исследуемые токи, напряжения и температура элементов оборудования с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровой код. Последовательность цифровых кодов, характеризующих сигнал за определенный период времени, поступает в центральный компьютер и обрабатывается. Блок дискретного преобразования Фурье раскладывает исследуемый сигнал в ряд Фурье. Определяются действующие значения коэффициентов гармонических составляющих тока K_m и напряжения K_{U_n} , угол между данными величинами $\varphi_{ui}(n)$, а также температурный коэффициент. Для фильтрации гармонических составляющих

фазных токов и напряжений, поступающих из сети, применяют углы сдвига по фазе $\varphi_{ui(n)}$: если угол сдвига меньше $+90^\circ$ или больше -90° , данная гармоническая составляющая поступает из сети и из анализа исключается.

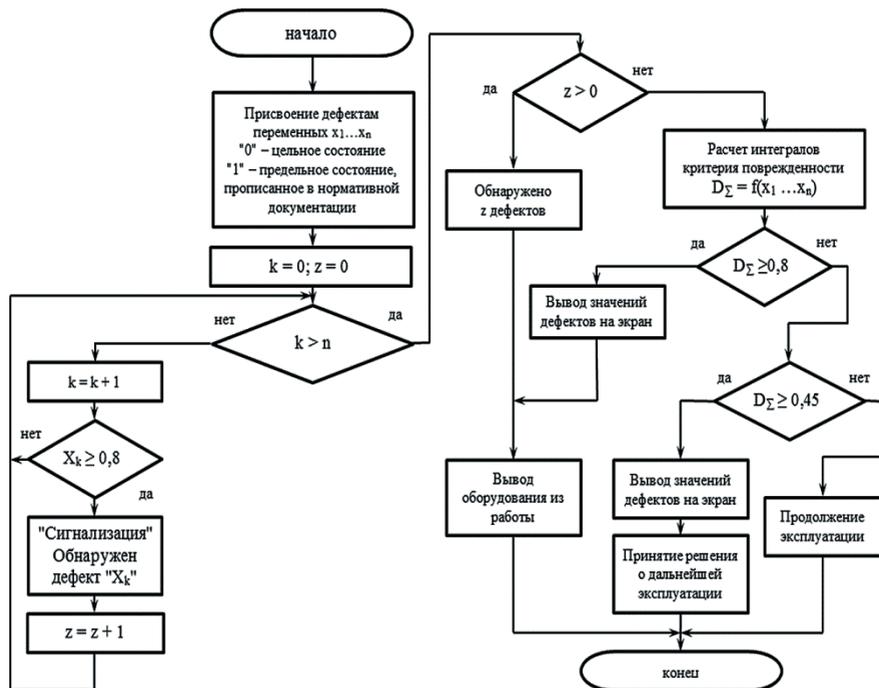


Рис. 1. Алгоритм оценки технического состояния машинного агрегата

Далее происходит обучение нейронной сети. Определяются K_{In} , K_{Un} , $\varphi_{ui(n)}$, $T_{подш}$ и $T_{изол}$ исследуемого агрегата, по значениям которых искусственная нейронная сеть формирует соответствующий числовой бинарный код. Бинарный код поступает в «Словарь», где сопоставляется с кодами известных дефектов. Если полученному коду соответствует известный дефект, то цикл идентификации кода режима работы и поврежденности элементов машинного агрегата D_m заканчивается, если не соответствует, то пользователю предлагается ввести в режиме «ручного ввода дефекта» наименование возможного повреждения. Далее данные поступают в искусственную нейронную сеть, которая определяет уровень поврежденности машинного агрегата в целом — значение интегрального диагностического параметра повреж-

денности D_{Σ} . Интегральный критерий формируется с помощью диагностических параметров D_{Σ} , сроков и условий эксплуатации, факторов пожаро- и взрывоопасности производства с соответствующими весовыми коэффициентами [6].

На рисунках 2 и 3 представлены результаты исследования центробежного вентилятора с асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором марки А4 мощностью 3 кВт с использованием разработанного учебно-исследовательского комплекса. После обработки экспериментальных данных с помощью программного продукта [7] делают заключение о техническом состоянии машинного агрегата.



Рис. 2. Спектр высших гармоник тока трех фаз электродвигателя

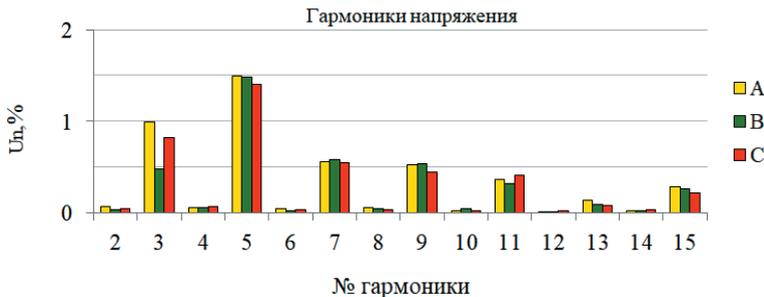


Рис. 3. Спектр высших гармоник напряжения трех фаз электродвигателя

Разработанный учебно-исследовательский комплекс предназначен для использования в учебном процессе при подготовке магистров по программам «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем» и «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» направления подго-

товки «Электроэнергетика и электротехника», при изучении дисциплин «Современные проблемы развития науки, техники и технологии (в электро- и теплоэнергетике)», «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения», «Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики электрических сетей», «Активно-адаптивные электрические сети», «Цифровые технологии в электроэнергетике» и демонстрации возможностей электромагнитного спектрального метода специалистам по эксплуатации и диагностике машинных агрегатов предприятий энергетики и нефтегазового производства.

Проект «Разработка учебно-исследовательского комплекса «Исследование взаимосвязи параметров высших гармоник токов и напряжений двигателей электропривода с техническим состоянием машинных агрегатов» реализован при поддержке внутривузовского гранта «Лидер УГНТУ — 2021. Инновации в образовании».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баширов М.Г., Прахов И.В.** Современные методы оценки технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2010. № 3. С. 7—14.
2. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г.** Интеллектуальная система управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов нефтегазового производства с электрическим приводом // Промышленная энергетика. 2019. № 6. С. 32—41.
3. **Интеграция** интеллектуальной системы диагностики машинных агрегатов в Scada-систему предприятия / И.Ф. Гумеров, Ю.А. Помазков, И.В. Прахов и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 10. С. 49—53.
4. **Самородов А.В., Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Абдуллин А.А.** Разработка программно-аппаратного комплекса для оценки технического состояния машинных агрегатов с электрическим приводом // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 10—20.
5. **Прахов И.В., Баширов М.Г., Самородов А.В.** Повышение эффективности использования искусственных нейронных сетей в задачах диагностики насосно-компрессорного оборудования применением теории планирования эксперимента // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2011. № 2. С. 14—17.
6. **Способ** диагностики механизмов и систем с электрическим приводом: патент на изобретение RU 2431152 С2 / И.Г. Кузеев, М.Г. Баширов, И.В. Прахов, Э.М. Баширова, А.В. Самородов. Заявл. 23.11.09, опубл. 10.10.11. Бюл. № 28.
7. **Диагностика** взрывозащищенных агрегатов по значениям параметров гармонических составляющих токов и напряжений электропривода / М.Г. Баширов, И.Г. Кузеев, А.В. Самородов, И.В. Прахов, Д.Г. Чурагулов, А.Г. Абдуллин. Св-во

о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661419. Дата регистрации 14.12.2021.

8. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Шлейников И.С.** Экспериментальные исследования взаимосвязи параметров гармонических составляющих токов и напряжений двигателя электропривода с техническим состоянием и режимами работы агрегата для создания базы данных частотных моделей / Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. 2020. Т. 2. С. 13—18.

М.Г. Баширов carp@yandex.ru,

Д.Ш. Акчурин akihiro177@mail.ru,

Э.А. Коновалов edward.hardwork@mail.ru

УГНТУ, г. Салават

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ВИРТУАЛЬНОГО УЧЕБНО- ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Теория управления в том или ином виде присутствует в учебных планах практически всех направлений подготовки специалистов с высшим образованием. В области управления техническими объектами последние 100 лет успешно развивались автоматизированные, а затем и автоматические системы управления, которые начали выполнять функции человека по управлению техническими системами, но они работали по жестким алгоритмам и программам, имели существенные ограничения в сферах применения из-за невозможности полностью заменить человека с его интеллектом. Но появившиеся в последние десятилетия системы автоматического управления, построенные на нечеткой логике, искусственных нейронных сетях и генетических алгоритмах, сделали возможным их использование во всех областях человеческой деятельности, они начали осуществлять интеллектуальное управление объектами, часто даже более эффективно, чем если бы это делал человек. Особенно это наглядно видно на примере электроэнергетических систем [1, 2]. Россия с 2008 года вслед за развитыми западными странами и Китаем официально взяла курс на интеллектуализацию электроэнергетики (идеология Smart Grid). В 2012 г. при участии АН РФ была разработана и принята «Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Редакция 5.0», которая предполагает активное участие искусственного интеллекта для управления объектами электроэнергетики, начиная от генерации электрической энергии и до ее потребления, включая управление системами диагностики, обслуживания и ремонта, переключениями в аварийных режимах и при оптимизации загрузки электрических сетей. Развитие распределенной генерации электроэнергии и появ-

ление возможности двунаправленной передачи электроэнергии сделало управление электрическими сетями «вручную» диспетчерскими службами просто невозможным. Все эти задачи теперь возлагают на распределенные интеллектуальные системы управления энергетическими системами.

Реализация интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) без цифровизации электроэнергетики невозможна. Стратегической основой цифровизации энергетики являются следующие документы:

— Концепция «Цифровая трансформация 2030», утверждена Советом директоров ПАО «Россети» 21.12.2018;

— «Положение ПАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе», утверждена Советом директоров ПАО «Россети» 02.04.2021;

— «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утверждена Правительством Российской Федерации 09.06.2020.

Цифровизация энергетики — часть глобального тренда, в рамках которого быстро развивающиеся цифровые технологии проникают во все сферы экономики. Для энергетики это создает новые возможности управления распределенной генерацией совместно с другими видами распределенных энергоресурсов. Автоматизация, возможность наблюдать за состоянием оборудования и управлять им посредством интернета вещей, распространение накопителей энергии и новых бизнес-моделей их использования постепенно превращают потребителей в активных полноправных участников энергосистемы. Все эти технологии обеспечивают повышение гибкости и адаптивности энергосистемы, сглаживание пиковой нагрузки, снижение потерь, расширение возможностей распределенной генерации и повышение приемлемой доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе, а главное — переход к новым принципам управления энергосистемами и организации рыночных операций на базе новых информационных технологий. Резкое повышение производительности компьютерных технологий, систем передачи, накопления и обработки информации, интегрированных в глобальную информационную сеть Интернет, «умных счетчиков» и т.д. в сочетании с технологиями искусственного интеллекта позволяет радикально улучшить управляемость всех элементов энергосистемы (вплоть до отдельных бытовых приборов).

Выпускник вуза по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника» должен быть готов к профессиональной деятельности в условиях, когда большинство функций по управлению объектами электроэнергетики будет возложено на системы искусственного интеллекта. Кроме традиционных знаний, умений и навыков по монтажу, наладке, эксплуатации и ремонту силового электроэнергетического оборудования он должен

хорошо знать и уметь поддерживать в исправном техническом состоянии и управлять информационной частью интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Для подготовки таких специалистов учебные заведения должны иметь лабораторные установки и комплексы, позволяющие учащимся получить необходимые умения и навыки; это потребует создания новых или расширение функциональных возможностей уже существующих лабораторных установок учебных заведений путем дополнения их виртуальными объектами и интеллектуальными средствами управления для организации выполнения работ, в том числе в дистанционном формате.

Большинство отечественных вузов энергетического направления имеет учебные лаборатории с лабораторными установками, содержащими современные программно-технические комплексы, но в качестве объектов управления в этих установках обычно выступают простейшие энергетические объекты, для управления которыми функциональные возможности программно-технических комплексов не используются в полной мере, поэтому обучающиеся не имеют возможности приобретения необходимых умений и навыков настройки и эксплуатации систем управления этими объектами [3].

В последние годы в учебный процесс вузов активно внедряют цифровые технологии, объединяемые понятием четвертой промышленной революции (Industry 4.0). Среди этих технологий важное место занимает концепция создания и использования цифровых двойников, на основе которых создаются виртуальные лаборатории. Цифровой двойник представляет собой цифровую модель физического объекта, которая имитирует его работу в реальном времени. Виртуальная лаборатория представляет собой программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить исследования без непосредственного контакта с реальной установкой или при полном отсутствии реальной установки. В первом случае имеем дело с виртуальной лабораторией с удаленным доступом, в состав которой входят реальные лабораторные установки, программные и технические средства для управления установками и получения экспериментальных данных, средства коммуникации между преподавателем и обучающимися. Это виртуальные дистанционные лаборатории. Во втором случае все лабораторные установки и исследуемые процессы полностью моделируются при помощи компьютерных программ, такие лаборатории называются виртуальными моделируемыми лабораториями [4].

В условиях пандемии и отмены полноценных производственных практик для многих вузов использование виртуальных моделируемых лабораторий явилось единственным способом предоставить обучающимся возможность получить определенные навыки управления объектами электроэнергетики с использованием виртуальных систем управления. В этих условиях интерес

вузов к виртуальным моделируемым лабораториям многократно возрос. Однако виртуальные моделируемые лаборатории имеют ряд существенных недостатков:

— обучающиеся лишены возможности работы с реальными техническими средствами и объектами управления;

— отсутствуют тактильные ощущения, отсутствуют практические навыки работы с инструментом и измерительными приборами, необходимыми в профессиональной деятельности;

— сведено до минимума общение обучающихся с преподавателем в процессе выполнения виртуальных лабораторных работ. Как правило, обучающиеся получают основные профессиональные умения и навыки в процессе общения с преподавателем при выполнении лабораторных работ в условиях существования реальных опасностей, обусловленных наличием электрического напряжения, перемещающихся и вращающихся частей исполнительных устройств, воды, сжатого воздуха;

— безопасность проведения виртуальных экспериментальных исследований, возможность легко вмешаться в ход технологического процесса и прерывать его в любой момент, без страха изменять любые параметры — все это может привести к формированию чувства «безнаказанности» за неправильно принятые решения и действия, что впоследствии может негативно проявиться при работе на реальных объектах;

— как показывает опыт, первоначально выполнение виртуальных лабораторных работ воспринимается обучающимися с энтузиазмом как продолжение привычных с детства компьютерных игр, но со временем, почувствовав разницу между условиями работы с виртуальными объектами и реальными условиями работы в производственных условиях, они теряют к ним интерес, что сказывается на качестве обучения и, соответственно, на качестве подготовки специалистов.

Очевидно, что невозможно подготовить специалиста, который знаком с объектами профессиональной деятельности только в виде их компьютерных моделей. В процессе обучения необходимо сочетать выполнение как реальных, так и виртуальных лабораторных работ с учетом их достоинств и недостатков.

В рамках создания ресурсного обеспечения для вновь открываемой в Уфимском государственном нефтяном техническом университете магистерской программы «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» реализован проект «Разработка цифровых двойников и учебно-исследовательского комплекса на базе действующих физических моделей объектов и систем управления для расширения их функциональных возможностей и дистанционного выполнения лабораторных работ».

Цели проекта:

— организация дистанционного выполнения лабораторных работ с использованием существующих лабораторных установок с физическими моделями объектов управления;

— расширение функциональных возможностей существующих лабораторных установок с физическими моделями объектов управления путем дополнения их виртуальными объектами и средствами управления;

— разработка цифровых двойников существующих лабораторных установок и создание на их основе виртуального учебно-исследовательского комплекса.

Задачи, решаемые при выполнении проекта:

— разработка моделей отдельных элементов и цифрового двойника существующего учебно-исследовательского комплекса «Системы автоматического управления» на основе программных и технических средств компании Yokogawa Electric Corporation и дополнение его виртуальными объектами и средствами управления;

— разработка моделей отдельных элементов и цифрового двойника существующего имитационно-моделирующего стенда «Системы автоматического управления» на основе программных и технических средств компании ЗАО «Экоресурс» и дополнение его виртуальными объектами и средствами управления;

— разработка моделей отдельных элементов и цифрового двойника существующего имитационно-моделирующего стенда «Системы автоматического управления» на основе программных и технических средств компании ПО «ОВЕН» и дополнение его виртуальными объектами и средствами управления;

— разработка структурной и функциональной схем виртуального учебно-исследовательского комплекса на основе цифровых двойников существующих лабораторных установок;

— организация дистанционного выполнения лабораторных работ с использованием существующих установок, дополненных виртуальными объектами управления и средствами автоматизации;

— организация выполнения виртуальных лабораторных работ с использованием цифровых двойников существующих лабораторных установок;

— разработка учебно-методических пособий для дистанционного выполнения лабораторно-практических работ с использованием существующих лабораторных установок и их цифровых двойников.

Понятие «Индустрия 4.0» охватывает много новых направлений и технологий, в том числе моделирование, виртуализация и создание цифровых копий или двойников объектов и систем. Отечественные производители промышленных контроллеров и средств управления (ЗАО «Экоресурс», ПО

«ОВЕН») разработали для своих контроллеров программы-эмуляторы, которые в сочетании со средой для конфигурирования и SCADA-системой позволяют реализовать полноценные виртуальные стенды для изучения систем управления. Эмуляторы контроллеров, работающие в реальном времени с эмуляцией органов управления, обладают возможностью изменения состояния различных элементов самого контроллера, объектов управления, исполнительных механизмов и значений сигналов датчиков. Эмуляторы имеют возможность имитировать работу с датчиками различных типов. Датчики имитируются посредством задания сигналов требуемого типа (дискретный, аналоговый) и вида (константа, периодическая функция). Состояние имитируемых дискретных датчиков можно вводить вручную или автоматически путем задания интервалов времени их включения/отключения. Значения имитируемых аналоговых датчиков можно задавать вручную или изменять автоматически по предустановленным математическим функциям. Предусмотрена эмуляция управляющих сигналов для исполнительных механизмов. Контроль физического состояния выходных каналов дает возможность проверить правильность выдачи сигналов на исполнительные механизмы, работу внешней сигнализации и ее квитирование, корректное срабатывание блокировок, снятие блокировок с памятью и др. В эмуляторе контроллера с функцией ПИД-регулирования есть возможность эмулировать работу с объектами управления, характеристики которых задают посредством специально разработанных настроек.

Существующие стенды дополнены моделями типовых объектов и средств управления для расширения их функциональных возможностей, созданы с использованием программ эмуляции и конфигурирования цифровые двойники стендов для возможности дистанционного выполнения и моделирования лабораторных работ [5—10].

Система дистанционного выполнения лабораторных работ предоставляет следующие возможности:

— *преподавателям*: проводить обучение студентов в режиме интернет-видеоконференции, демонстрировать им устройство лабораторной установки и порядок выполнения лабораторных работ;

— *обучающимся*: в режиме реального времени знакомиться с устройством лабораторной установки с возможностью рассматривать крупным планом отдельные приборы и элементы, дистанционно наблюдать за состоянием объектов управления, контролировать значения технологических параметров и выполнять функции оператора;

— выполнять дистанционно лабораторные работы согласно разработанным учебно-методическим пособиям;

— задавать режимные параметры эксперимента;

- рассчитывать и выставлять настроечные параметры контроллеров системы управления;
- снимать показания любого измерительного прибора, задействованного в эксперименте;
- сохранять графики изменения параметров процесса;
- проводить математическую обработку и анализ результатов измерений;
- оформлять электронный отчет и защищать результаты выполненной работы, отвечая на контрольные вопросы преподавателя.

Разработанный учебно-исследовательский комплекс предназначен для использования в учебном процессе при подготовке магистров по программам «Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем» и «Интеллектуальные средства и системы управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов» направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника», при изучении дисциплин «Современные проблемы развития науки, техники и технологии (в электро- и теплоэнергетике)», «Интеллектуальные средства управления режимами систем электроснабжения», «Интеллектуальные системы управления, защиты и автоматики электрических сетей», «Активно-адаптивные электрические сети», «Цифровые технологии в электроэнергетике».

Проект «Разработка цифровых двойников и учебно-исследовательского комплекса на базе действующих физических моделей объектов и систем управления для расширения их функциональных возможностей и дистанционного выполнения лабораторных работ» реализован при поддержке внутривузовского гранта «Лидер УГНТУ — 2021. Инновации в образовании».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Юсупова И.Г.** Интеллектуальные средства и системы управления и защиты электрических сетей: учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. 64 с.
2. **Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г.** Интеллектуальные системы управления и обеспечения безопасности в электроэнергетических комплексах: учебное пособие. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2020. 48 с.
3. **Кудрин Б.И., Жилин Б.В., Матюнина Ю.В.** Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 413 с.
4. **Кислицын Н.А., Акчурин Д.Ш., Баширов М.Г.** Лабораторный комплекс на основе микропроцессорных средств компании «ОВЕН» // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 2 (36). С. 109—114.
5. **Баширов М.Г., Баширова Э.М., Хуснутдинова И.Г.** Электромагнитный спектральный метод диагностики турбогенераторов тепловых электростанций // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 20—26.

6. **Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г.** Интеллектуальная система управления техническим состоянием и энергетической эффективностью машинных агрегатов нефтегазового производства с электрическим приводом // Промышленная энергетика. 2019. № 6. С. 32—41.
7. **Совершенствование** методов оценки технического состояния силовых трансформаторов / М.Г. Баширов, И.В. Прахов, А.С. Хисматуллин, И.Г. Хуснутдинова // Промышленная энергетика. 2018. № 7. С. 2—10.
8. **Баширов М.Г., Павлова З.Х., Хафизов А.М.** Разработка виртуального тренажера-имитатора для отработки навыков действия персонала при нештатных и аварийных режимах работы трубчатой печи // Нефтегазовое дело. 2018. № 4. С. 161—181.
9. **Способ** диагностики механизмов и систем с электрическим приводом / И.Р. Кузеев, М.Г. Баширов, И.В. Прахов, Э.М. Баширова, А.В. Самородов. Патент на изобретение RU 2431152 С2, 10.10.2011. Заявка № 2009143292/28 от 23.11.2009.
10. **Обоснование** структуры солнечно-дизельного комплекса распределенной генерации на основе нечетких множеств / М.А. Авербух, Е.В. Жилин, Е.Ю. Сизганова, М.В. Абдулваххаб // Промышленная энергетика. 2021. № 5. С. 45—52.

*Н.С. Быков, xoogami@gmail.com,
О.В. Самолina, 23helga@mail.ru, ТГУ, г. Тольятти*

ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В РАМКАХ СТРАТЕГИИ ЗЕЛЕННОГО ПЕРЕХОДА

В современной истории мы становимся свидетелями стремительно прогрессирующего глобального изменения климата. Одна из основных причин данного явления — антропогенная эмиссия парниковых газов, рост концентрации углекислого газа в атмосфере.

Инструментальные измерения с конца XIX века демонстрируют тренд на увеличение температуры поверхности земли, что ведет за собой значительные изменения в сельскохозяйственном направлении разных стран, поиск альтернативных способов ведения земледелия, разведения скота и др. Кроме того, повышение температуры приводит к ускоренному таянию ледников Южного и Северного полюсов и, как следствие, к повышению уровня Мирового океана, которое сопровождается учащением наводнений и затоплением значительных площадей суши. На рисунке 1 приведены отклонения среднегодовой температуры земной поверхности от средней за период 1961—1990 гг. по данным прямых измерений, а на рис. 2 — изменение уровня Мирового океана с 1993 г. по данным спутниковой альтиметрии [1].

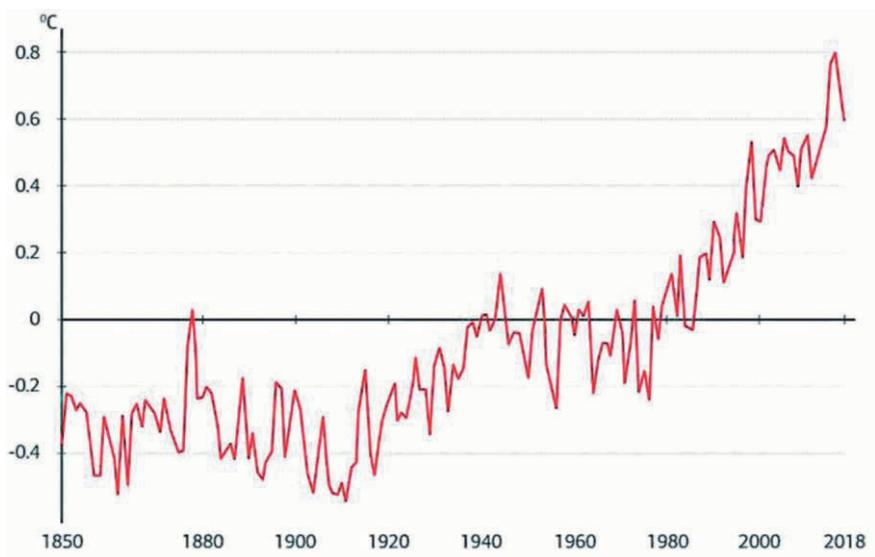


Рис. 1. Отклонения среднегодовой температуры земной поверхности от средней, °C

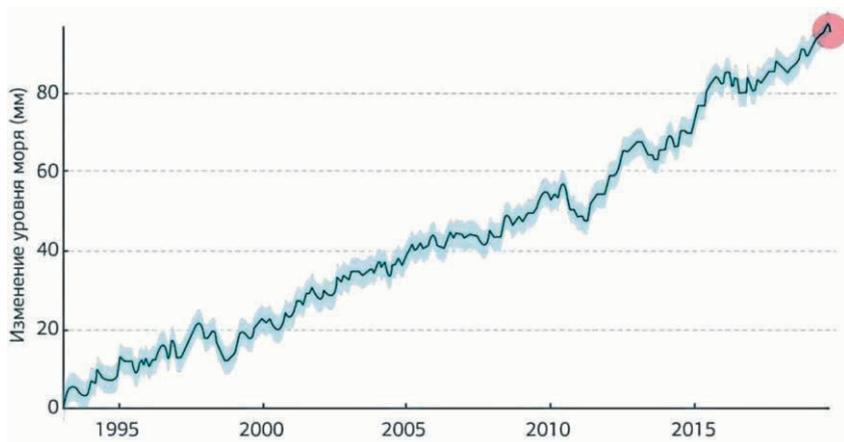


Рис. 2. Изменение уровня Мирового океана с 1993 г., мм

Более наглядное и предметное отображение отклонения температур по земному шару от средней температуры в период с 1951 по 2019 гг. приведено на рис. 3.

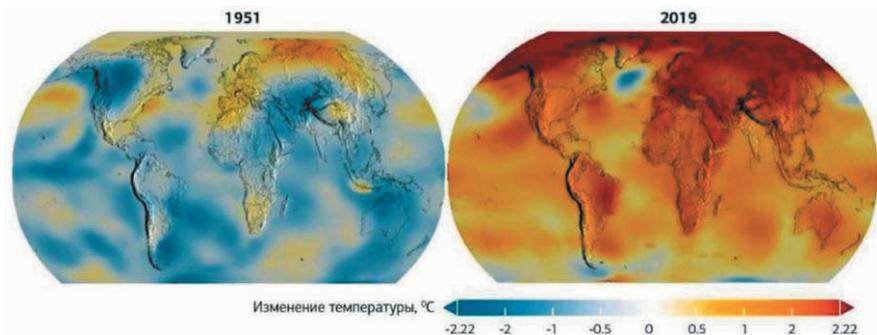


Рис. 3. Отклонения температуры земной поверхности от средней, °C

Согласно статистике в период с 1980 г. число природных катастроф и иных неблагоприятных событий, причиной которых стали климатические изменения, возросло в 2,5 раза, а общий нанесенный ущерб оценивается в 5 трлн долларов [2].

Углеродный след. Совокупность всех выбросов парниковых газов, произведенных прямо или косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом, характеризуется понятием «углеродный след». Основным парниковым газом является углекислый газ (CO_2), поэтому в оценке воздействия парниковых газов используется CO_2e — показатель углеродного следа. Значения потенциального глобального потепления используется для приведения выбросов парниковых газов к CO_2e .

Значимым аспектом декарбонизации является учет углеродного следа для последующей оценки и принятия мер по его уменьшению, перехода к так называемой углеродной нейтральности. В настоящее время учет ведется в соответствии с установленными границами выбросов парниковых газов, характеризующимися сферами охвата Score 1, 2 и 3 [3]. Обобщенная схема представлена на рис. 4.

Score 1 — *прямые выбросы*: выбросы из источников, которые принадлежат или контролируются компанией (выбросы при производстве собственной энергии, выбросы от транспорта и оборудования, работающего на топливе, размещение отходов), подразделяются на несколько категорий:

- выбросы от сжигания топлива в стационарных источниках;
- выбросы от сжигания топлива в передвижных источниках;
- выбросы при захоронении и сжигании отходов;

— неконтролируемые выбросы — не характерные для деятельности компании, отсутствуют утечки газа из оборудования, выбросы и их удаление при землепользовании, изменении землепользования и в лесном хозяйстве.

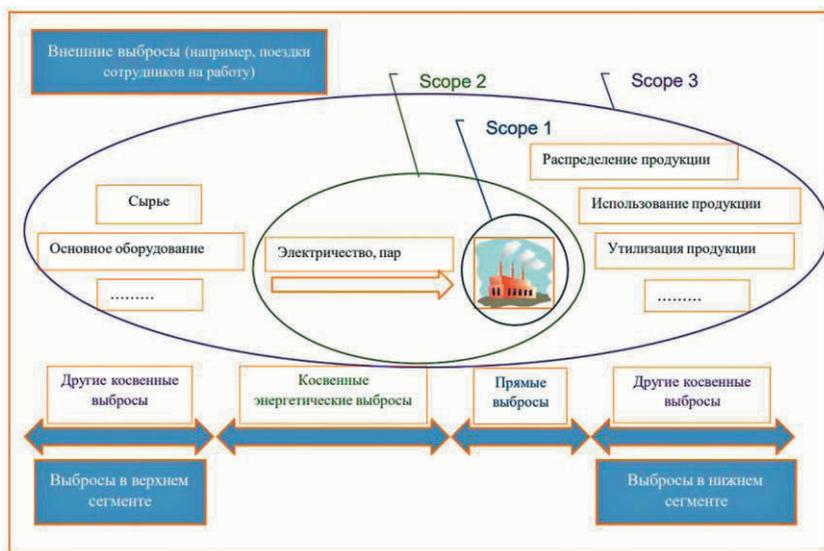


Рис. 4. Границы выбросов парниковых газов Scope

Scope 2 — *косвенные энергетические выбросы*: выбросы из источников производства импортируемого электричества, тепла или пара, потребляемые компанией (объем выбросов происходит на объекте, где производится электричество); имеют следующие подвиды:

- выбросы от выработки закупленной электроэнергии;
- выбросы от выработки энергии, полученной по физической сети (отопление, пар, охлаждение).

Scope 3 — *прочие косвенные выбросы*: выбросы, которые являются следствием деятельности компании, но происходят из источников, не принадлежащих или не контролируемых ей; подразделяются на выбросы в верхнем сегменте и нижнем сегменте.

Верхний сегмент Scope 3: деятельность, связанная с энергией, но не включенная в прямые и косвенные энергетические выбросы; закупленная продукция; основное оборудование; транспортировка и распределение в верхнем сегменте; командировки; имущество, арендованное в верхнем сегменте; перевозка клиентов и посетителей; перевозки сотрудников на работу. Нижний сегмент Scope 3: отходы, передаваемые специализированным организациям; инвестиции; транспортировка и распределение в нижнем сегменте; стадия использования продукции; окончание срока службы продукции; франшизы; имущество, арендованное в нижнем сегменте (см. рис. 4).

Переход к низкоуглеродной экономике. В мире наблюдается растущий тренд по снижению выбросов парниковых и газов и поддержке внедрения возобновляемых источников энергии. Маркеры, характеризующие тренд:

— большинство стран ратифицировали Парижское соглашение — юридически обязательный международный договор по тематике изменения климата [4];

— на многих рынках введены или планируются к введению сборы/налоги на выбросы CO₂, 46 государств и 32 региона запустили или запустят в ближайшем будущем национальные системы торговли CO₂/углеродные налоги [5];

— отрасли-потребители активно уходят от ископаемых источников энергии/энергоносителей;

— инвесторы сокращают объемы финансирования для компаний, работающих с ископаемыми источниками энергии, ожидаемая доходность, наоборот, резко возросла для проектов с ископаемыми углеводородами [6].

Перечислим основные направления перехода к низкоуглеродной экономике, определяющие возможности углеродной нейтральности:

— переход на энергоэффективные технологии (светодиоды, системы рекуперации тепла и т. д);

— декарбонизация электроэнергии (замена дизельного топлива на возобновляемую энергию или электрическую сеть);

— низкоуглеродный транспорт (использование аккумуляторных транспортных средств, конвейерная система транспорта руды);

— лесовосстановление;

— взаимодействие с поставщиками.

Методы декарбонизации ТЭК. Рассмотрим методы декарбонизации, соответствующие основным направлениям глобального энергоперехода более предметно для каждой из ранее рассмотренных сфер охвата выбросов парниковых газов.

Score 1. Прямые выбросы

Операционные методы: повышение операционной эффективности предприятий; энергоэффективное производственное оборудование; переработка, повторное использование и утилизация вторичных энергетических ресурсов; работа с поставщиками оборудования и услуг для сокращения их углеродного следа.

Эффективная монетизация метана и попутного нефтяного газа (ПНГ): сокращение сжигания ПНГ; сокращение утечек метана; использование установок рекуперации паров и уменьшения утечек метана из больших резервуаров; отслеживание неконтролируемых выбросов в атмосферу на нерабочих скважинах.

Перевод предприятий на собственные низкоуглеродные источники энергии: ВИЭ и методы их интеграции; хранение электроэнергии; использование низкоуглеродных источников энергии в перевозках (электромобили, аммиак, газ); использование собственного водорода для собственных нужд.

Score 2. Косвенные энергетические выбросы

Операционные методы: энергоэффективность зданий и пр.; работа с поставщиками электроэнергии и тепла для сокращения их углеродного следа.

Перевод предприятий на низкоуглеродные источники приобретаемого топлива и энергии: приобретение электроэнергии от ВИЭ; использование низкоуглеродных источников энергии в перевозках (электромобили, аммиак, газ); использование биотоплива в качестве сырья при нефтепереработке; использование водорода для собственных нужд.

Score 3. Прочие косвенные выбросы

Методы корпоративной стратегии: оптимизация портфеля активов (диверсификация в газовый бизнес, ВИЭ, водород и др.); торговля углеродными разрешениями или кредитами; сокращение ПГ за счет инвестиций в землепользование на основе регенеративных технологий.

Улавливание, хранение и использование CO₂: процесс улавливания, хранения и использования (захоронения) углерода; прямое улавливание диоксида углерода из воздуха; технология CO₂-EOR (технология закачки углекислого газа под давлением в пласт); биоэнергетика с использованием технологии улавливания и хранения углерода (BECCS).

Производство, продажа и использование водорода: производство, транспортировка и продажа водорода («зеленый» и «голубой» водород).

Возобновляемые источники энергии. В мире создалось мнение, что есть «хорошие» возобновляемые источники энергии и «плохие» невозобновляемые, но все не так прямолинейно, предупреждают директор отдела устойчивой энергетики Европейской экономической комиссии ООН Скотт Фостер и его коллега Дэвид Эльзинга в статье, опубликованной на сайте ООН [7]. Переход на чистую энергию займет не одно десятилетие. Ископаемые виды топлива, следует из их слов, еще долго будут оставаться частью энергосистемы, они за счет новых технологий (например, улавливания и хранения CO₂, входящего в состав парниковых газов) могут помочь сократить выбросы, став таким образом частью решения, а не оставаясь проблемой.

Отметим слабые стороны обновленной программы поддержки ВИЭ в Российской Федерации:

— объем программы сравнительно небольшой. Появление трансграничного углеродного регулирования потребует существенно больших объемов генерации ВИЭ, чем предусмотрено программами ВИЭ 1.0 и ВИЭ 2.0. В отсутствии данной энергетической инфраструктуры для декарбонизации Россия может столкнуться с тяжелыми последствиями для экономики;

— в новой программе поддержки ВИЭ требуется локализовать широкий спектр различных компонентов ВИЭ и обеспечить экспорт данной продукции;

— несмотря на сравнительно небольшой объем программы, ее стоимость значительна, так как потребители оплачивают любую предложенную технологию, локализацию и экспортные обязательства индустрии ВИЭ;

— развитие ВИЭ не должно приводить к существенному росту цен на электроэнергию, в противном случае российские экспортеры потеряют конкурентоспособность из-за роста затрат на электроэнергию, а не углеродных налогов.

Выводы

Декарбонизация ТЭК является одним из приоритетных направлений адаптации к негативным изменениям климата в РФ ввиду преобладания энергетических выбросов CO₂ в общей структуре.

Методы декарбонизации в ТЭК можно разделить на традиционные (существующие технологии, результат внедрения — прогнозируемый) и инновационные (технологии в разработке, внедрение рискованно).

Для эффективной декарбонизации в России необходимо расширить государственную поддержку научных исследований, апробации и венчурного финансирования технологий и проектов декарбонизации.

Для компаний ТЭК корпоративная климатическая стратегия и стратегия декарбонизации должны стать неотъемлемой частью общей стратегии с участием всех коммерческих и функциональных подразделений, а не рассматриваться только как сфера ответственности департаментов охраны труда, окружающей среды и техники безопасности и связей с инвесторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **NASA Hadley Centre (HadCRUT4)** [Электронный ресурс] URL: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4/>
2. **Allianz Risk Barometer 2020** [Электронный ресурс] URL: <https://www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/reports/Allianz-Risk-Barometer-2020-Appendix.pdf>
3. **POLYMETAL INTERNATIONAL PLC** [Электронный ресурс] URL: <https://www.polymetalinternational.com/en/>
4. **UN Climate Change Welcomes IPCC's**. Summary for Policy Makers on the Physical Science Basis of Climate Change [Электронный ресурс] URL: <https://unfccc.int/>
5. **State and Trends of Carbon Pricing 2020** [Электронный ресурс] URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33809>
6. **Coal financing costs have surged in past 10 years** — University of Oxford [Электронный ресурс] URL: <https://ieefa.org/coal-financing-costs-have-surged-in-past-10-years-university-of-oxford/>
7. **The Role of Fossil Fuels in a Sustainable Energy System** [Электронный ресурс] URL: [The Role of Fossil Fuels in a Sustainable Energy System | United Nations](https://www.un.org/ru/development/desa/pubs/energy-system)

СЕКЦИЯ 2

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ

*А.М. Кручинин, ankruchinin@yandex.ru,
М.Я. Погребисский, PogrebisskiyMY@mpei.ru,
Е.С. Рязанова, RiazanovaYS@mpei.ru.,
А.Ю. Чурсин, ChursinAY@mpei.ru,
НИУ «МЭИ» Москва*

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВДИМОСТИ В ПЛАЗМЕ ВНЕШНЕГО СТОЛБА РАЗРЯДА С ГОРЯЧИМ ПОЛЫМ КАТОДОМ, ПРИ РАБОТЕ НА ХОЛОДНЫЙ АНОД

Усложнившиеся в связи с развитием новой техники требования к конструкционным материалам и, в первую очередь, к металлам и сплавам, потребовали создания новых видов технологического оборудования, способного осуществлять с достаточной интенсивностью заданный процесс. Среди них особое место занимают вакуумные плазменные электропечи с горячими полыми катодами (ВПЭ с ГПК), которые используются для:

- плавления и рафинирования тугоплавких и реакционно-активных металлов, а также сталей и сплавов [1—7];
- получения и обработки порошков с целью их очистки и придания им заданных свойств (химическая чистота, вязкость, текучесть, химический состав и др.) [8—12].

Нагрев обрабатываемого материала в таких установках происходит в разреженной сильно неравновесной плазме столба разряда с полым катодом (РПК) и имеет электронный принцип [13]. Он отличается высокой энергетической эффективностью и направленностью переноса энергии в зоне обработки материала.

Структура и физическая модель внутреннего столба вакуумного РПК. Столб РПК отличается существенной неоднородностью по длине, его можно разбить на две характерные физические области (рис. 1): внутренний столб, находящийся внутри полости катода, и внешний столб, расположенный за пределами полости катода в вакуумной камере установки.

Внутренний столб, формирующийся внутри полости катода, существенно неоднородный. В полость катода непрерывно поступает плазмообразующий газ (чаще всего это аргон). Давление плазмы по длине внутреннего столба от

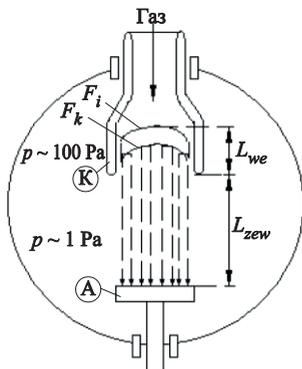


Рис. 1. Структура разряда с полым катодом в установке: К — полый катод; А — анод-кристаллизатор; F_i — фронт ионизации потока газа в полости катода; F_k — область критического слоя плазмы внутреннего столба

фронта ионизации F_i до среза катода изменяется от 300—700 Па примерно до 1—10 Па в плазме внешнего столба, т.е. изменяется на два-три порядка. Электроны, образующиеся в результате действия термоэмиссии на внутренней поверхности катода, поступают в объем плазмы внутреннего столба. Протяженность зоны эмиссии электронов зависит от распределения температур на поверхности полого катода, которая нагревается за счет интенсивной бомбардировки ионами. Протяженность зоны эмиссии электронов составляет примерно четыре радиуса r_k полости катода. Эмиссия электронов T_{ek} в слое плазмы от фронта ионизации F_i до критического слоя F_k составляет [13]

$$T_{ek} = \frac{3}{4} \frac{e}{k} (U_K - \phi_{im}),$$

где U_K — падение напряжения в прикатодном пристеночном слое (для аргона $U_K \approx 9 \div 12$ В);

ϕ_{im} — потенциал ионизации метастабильного атома аргона.

Температура электронов в докритическом слое плазмы внутреннего столба составляет величину $T_{e1} \approx 3 \cdot 10^4$ К, которой соответствует энергия теплового движения электрона $\bar{W}_{ed1} \approx 4$ эВ и энергия направленного движения

электронов в электрическом поле (энергия дрейфа) $\bar{W}_{ed1} = \frac{1}{16} \bar{W}_{e1} \approx 0,25$ эВ.

Температура и энергия электронов в этой области столба — примерно постоянные величины, слабо зависящие от тока разряда.

Концентрация электронов вблизи критического фронта F_k распада плазмы зависит от тока разряда I и радиуса r_k полости катода. Напряженность электрического поля E_1 в плазме докритического поля столба составляет

$$E_1 = 0,83 \cdot 10^2 \frac{I_{ei}}{d_k^2 T_{ek}^{3/2}},$$

где L_{ei} — кулоновский логарифм плазмы.

На некотором удалении от фронта ионизации F_i начинается непрерывное убегание высокоэнергетических электронов плазмы. Этот процесс приводит к избытку положительного пространственного заряда ионов и росту напряженности электрического поля. Протяженность докритического слоя соиз-

мерима со средней длиной свободного пробега электронов в слое и составляет величину порядка $10^{-4} \div 10^{-3}$ м. Начиная от фронта F_{kr} до среза катода электроны теряют связь с ионами и непрерывно ускоряются в электрическом поле к выходу из полости в направлении движения рабочего газа. Значение критического значения напряженности электрического поля E_{kr} , при котором электроны в плазме переходят в режим «убегания» (непрерывного ускорения), определяется выражением

$$E_{kr} = \frac{2\pi n_e e^3}{(4\pi\epsilon_0)^2 k T_e} = 0,15 \cdot 10^{-12} n_e \frac{L_{ei}}{T_e},$$

где ϵ_0 — диэлектрическая постоянная; T_e — температура электронов; n_e — концентрация электронов; e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; L_{ei} — кулоновский логарифм. Напряженность электрического поля в каждом сечении внутреннего столба в этой области будет соответствовать критическому значению $E(x)_{kr} = E_{kr}(n_e, T_e)$. Значение энергии направленного движения электронов на выходе из полости катода будет зависеть от распределения напряженности электрического поля, концентрации и температуры электронов в критическом слое внутреннего столба от критического фронта F_{kr} с координатой $x = x_{kr}$ до выхода из полости катода с координатой $x = L_{we}$.

Энергия направленного движения электронов на выходе из катода является важнейшим параметром РПК, определяющим все энергетические и технологические характеристики вакуумного плазменного нагрева в установке. Температура атомарного компонента T_m в разряде не может существенно отличаться от температуры полого катода в зоне эмиссии электронов и составляет на всей протяженности столба $T_m \approx 3 \cdot 10^3$ К. Температура электронов T_{ew} в процессе их убегания в критическом слое не может отличаться от температуры электронов T_{ek} в докритическом слое внутреннего столба. Для разреженной плазмы с давлением 10—100 Па при температуре электронов $T_e = 10^4$ К значение критической напряженности E_{kr} составляет не столь большую величину порядка 10^3 В/м [14—16] и может быть реализована в самостоятельной форме электрического разряда.

Анализ потерь энергии электронов проводимости в плазме внешнего столба разряда с ГПК, работающего на холодный анод. Если допустить, что при работе ВПЭ с ГПК давление в печи постоянно ($P_{печи} = \text{const}$), то давление в плазме столба будет также величиной постоянной ($P_{cm} = \text{const}; \frac{dP}{dx} = 0$). Допустим также, что изменение давления электронной компоненты P_e вдоль оси столба также равно нулю ($\frac{dP_e}{dx} = 0$), т.е. давле-

ние электронной компоненты в плазме внешнего столба разряда также является постоянной величиной ($P_e = \text{const}$). Здесь давление электронов в плазме определяется выражением $P_e = n_e k T_e$.

Следовательно, для соблюдения постоянства давления P_e в плазме столба необходимо либо одновременное изменение концентрации электронов n_e в столбе и их температуры T_e , либо постоянство обоих параметров: $n_{e(l)} = n_e = \text{const}$; $T_{e(l)} = T_e = \text{const}$.

Изменение температуры электронов T_e в плазме внешнего столба разряда можно определить по длине релаксации электронов. Если воспользоваться выражением для определения длины пути максвеллизации электронов на парных кулоновских столкновениях [17]

$$l_{W_e} = \frac{W_e^2}{4\pi q^4 n_e l \cdot L_{ei}} = \frac{W_e^2}{2,5 \cdot 10^{-16} n_e},$$

где W_e — энергия электронов, эВ; L_{ei} — кулоновский логарифм, принятый равным 10; n_e — концентрация электронов, м^{-3} , то при $W_e = 25$ эВ и $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ длина пути максвеллизации электронов $l_{W_e} \approx 0,25$ м. Длина пути электронов определяется по выражению

$$l_{W_e} = \frac{1}{n_e \sigma_{ea}},$$

где σ_{ea} — эффективное сечение возбуждения атомов при неупругих взаимодействиях с электронами, показывает, что при $n_e = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и $\sigma_{ea} = 10^{-20} \text{ м}^2$ $l_{W_e} \approx 0,1$ м. Таким образом, длина релаксации электронов проводимости в аргоновой плазме соизмерима с длиной межэлектродного расстояния L разряда с полым катодом, которое в ВПЭ с ГПК составляет около 0,2—0,4 м. Поскольку длина релаксации электронов в аргоновой плазме внешнего столба соизмерима с межэлектродным расстоянием, можно считать, что температура электронов T_e в плазме внешнего столба практически не изменяется вдоль его оси: $T_e \approx T_{e(l)} = \text{const}$. Постоянство давления электронов и их температуры в плазме внешнего столба, принятые в качестве допущения, влекут за собой постоянство концентрации электронов n_e в столбе: $n_e \approx n_{e(l)} = \text{const}$.

С учетом сделанных допущений рассмотрим процессы столкновений, которые могут происходить в плазме внешнего столба РПК. Мерой вероят-

ности того, что при данных условиях будет иметь место тот или иной тип столкновений, служит эффективное сечение взаимодействия частиц σ , величина которого зависит от энергии электронов и химической индивидуальности атомов, с которыми эти электроны взаимодействуют.

В плазме внешнего столба РПК электроны взаимодействуют с нейтральными атомами и ионами плазмообразующего инертного газа (обычно аргона) и расплавляемого металла. При упругом взаимодействии электронов с низкими энергиями с атомами аргона максимальное эффективное сечение рассеяния σ_s составляет величину, равную $\approx 25 \cdot 10^{20} \text{ м}^2$, а для атомов гелия $\sigma_s \approx 5 \cdot 10^{20} \text{ м}^2$. По порядку величины это примерно соответствует размерам самих атомов этих газов. Если учесть, что атомы расплавляемых тугоплавких металлов могут иметь не только равные, но и большие размеры электронной оболочки, то величина эффективного сечения рассеяния может иметь большее значение.

При упругом соударении атому передается лишь незначительная часть энергии электрона, пропорциональная $\frac{2m_e}{m_i}$. Известно [17], что для такого

тяжелого атома, каким является атом аргона, и при энергии электрона строго больше первого порога возбуждения, энергия, теряемая электроном в этом случае, значительно меньше величины потери энергии в результате одного неупругого соударения ($\ll 0,1 \text{ эВ}$). Практически величина потерь энергии при упругом взаимодействии электронов с нейтральными атомами соответствует потерям энергии на Джоулев нагрев плазмы внешнего столба:

$$q_{em}^{\text{упр}} \approx j^2 / \sigma(W_e),$$

где j — плотность тока разряда; σ — удельная электропроводность, которая в сильно ионизированной плазме не зависит от концентрации заряженных частиц, а зависит только от энергии электронов $\sigma \sim W_e^{3/2}$.

Таким образом, из-за значительного превышения потерь энергии электронами при неупругом взаимодействии над потерями энергии при упругом взаимодействии с атомами плазмообразующего газа и расплавляемого металла в условиях резко неравновесной сильно ионизированной разреженной плазмы внешнего столба РПК ($q_{em}^{\text{упр}} \ll q_{em}^{\text{неупр}}$) потерями энергии электронами при упругих столкновениях можно пренебречь. Наиболее полно различные типы возбуждения атомов аргона электронным ударом можно проследить, если рассмотреть диаграмму энергетических уровней аргона (рис. 2).

Первая возбужденная конфигурация $3p^5 4s$ содержит четыре уровня — два метастабильных 3p_0 и 3p_2 и два резонансных (3p_1 и 1p_1), энергия которых близка к 12 эВ.

Конфигурация $3p^5 3d$ располагает двумя связанными с основным состоянием уровнями, поэтому и эффективные сечения довольно велики. Вклад этих, а также и других возбужденных конфигураций, в величину эффективных сечений можно определить по рис. 3, на котором изображены функции эффективных сечений возбуждения и ионизации атомов аргона, находящихся в основном состоянии, от энергии ударяющихся электронов. Суммарное эффективное сечение возбуждения атомов аргона в зависимости от энергии возбуждающего электрона приведено на рис. 4. Как следует из рисунка, максимальное эффективное сечение возбуждения атома аргона $\sigma_{ea}^{Ar \max}$ имеет величину около $1,1 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$, при этом энергия возбуждения электрона составляет величину около 24 эВ, т.е. больше величины среднего потенциала возбуждения атома аргона U_{ea}^{*Ar} , который, согласно рис. 4, равен приблизительно 12 эВ.

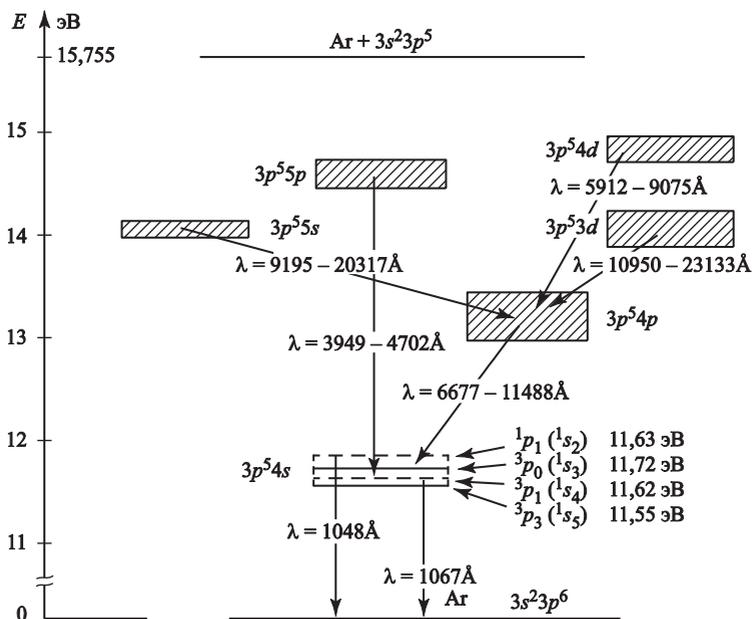


Рис. 2. Диаграмма энергетических уровней атома аргона [18]

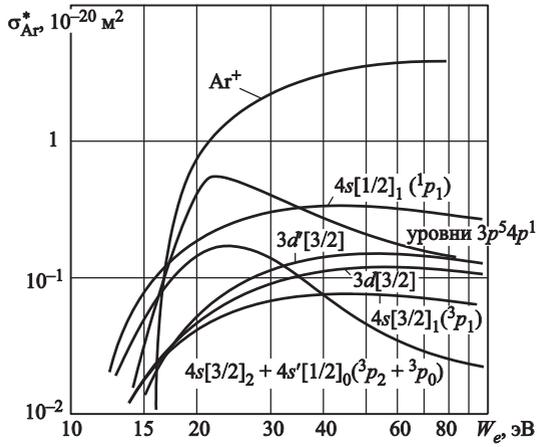


Рис. 3. Функции эффективных сечений возбуждения и ионизации атомов аргона из основного состояния от энергии электронов для различных энергетических уровней [18]

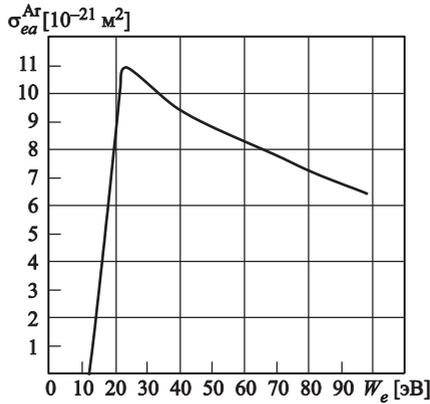


Рис. 4. Результирующая зависимость эффективного сечения возбуждения атомов аргона от энергии электронов

Возбуждение ионов аргона электронным ударом возможно в общем случае с прямого возбуждения из основного состояния атома. Для этого электрону нужно иметь значительную энергию, судя по результатам работ [17, 19], которые находятся в хорошем согласии между собой. В плазме внешнего столба РПК вклад в потери энергии электронами при прямом возбуждении ионов из основного состояния атома аргона электронным ударом дол-

жен быть пренебрежимо мал, так как даже при энергии электронов в 40 эВ величина эффективного сечения прямого возбуждения иона $\sigma_{ei\text{прям}}^{\text{Ar}}$ еще очень низка и имеет порядок величины около 10^{-23} м^2 . Таким образом, имеет смысл рассмотреть процесс неупругого взаимодействия электронов с ионами плазмообразующего газа только как ступенчатое возбуждение ионных состояний, когда электроны имеют энергию, сравнимую с энергией ступенчатого возбуждения иона (для аргона средний потенциал возбуждения иона $U_{ei}^{*\text{Ar}} = 19,5 \text{ В}$).

Энергия, теряемая электронами за одну секунду в единичном объеме плазмы, при неупругих столкновениях определяется как сумма потерь энергии при возбуждении атомов $(en_e U_{ea}^{*r} v_{ea})$ и ступенчатом возбуждении ионов $(en_e U_{ei}^{*r} v_{ei})$:

$$q_{em}^{\text{неупр}} = en_e U_{ea}^{*r} v_{ea} + en_e U_{ei}^{*r} v_{ei},$$

где $v_{ea} = n_a^r (\ddot{V}_e \sigma_{ea}^r)$ — частота электрон-атомных столкновений; $v_{ei} = n_i^r (\ddot{V}_e \sigma_{ea}^r)$ — частота электрон-ионных столкновений; σ_e^r и σ_{ei}^r — эффективные сечения возбуждения атомов и ионов соответственно.

С учетом выражений для v_{ea} и v_{ei} из этого уравнения следует, что вклад в общие потери энергии электронами каждого из рассматриваемых нами видов неупругих столкновений может быть оценен, если известны концентрация возбуждающихся частиц, их средний потенциал возбуждения и соответствующее эффективное сечение.

Средние потенциалы возбуждения атомов $U_{ea}^{*\text{Ar}}$ и ионов $U_{ei}^{*\text{Ar}}$ аргона мы уже сравнивали, величины их незначительно отличаются друг от друга и имеют один порядок. В то же время эффективные сечения возбуждения ионов σ_{ei}^{Ar} при энергии электронов больше 10 эВ, как правило, на порядок превышают эффективные сечения возбуждения атомов σ_{ea}^{Ar} . Указанное превышение связано с влиянием дальнедействующего кулоновского поля, которое приводит к увеличению эффективной плотности потока электронов, в результате чего даже на пороге возбуждения сечение оказывается конечным, а не равным нулю, как в случае возбуждения нейтральных атомов. Таким образом, $\sigma_{ei}^{\text{Ar}} \approx 10 \sigma_{ea}^{\text{Ar}}$. Однако, даже при знании величины эффективных сечений возбуждения нельзя еще с полной уверенностью считать, что

потери энергии электронами при возбуждении ими ионных состояний аргона значительно превосходят потери энергии электронами при возбуждении ими атомов аргона. Для этого необходимо еще оценить величины концентрации нейтральных атомов и ионов в плазме внешнего столба разряда.

В силу квазинейтральности исследуемой нами плазмы внешнего столба концентрация ионов n_i приблизительно соответствует концентрации электронов n_e . Следовательно, в соответствии с экспериментальными данными $n_i^{\text{Ar}} \approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Концентрация нейтральных атомов аргона при работе разряда на холодный анод определяется парциальным давлением нейтрального газа P_m^r , протекающего в камеру электропечи с температурой тяжелой компоненты T_m^r , равной температуре стенок катода в активной зоне эмиссии $T_{\text{стен max}}$. Таким образом, парциальное давление нейтрального газа определяется выражением

$$P_m^r = n_m^{\text{Ar}} k T_m^r,$$

где $n_m^{\text{Ar}} = n_a^{\text{Ar}} + n_i^{\text{Ar}}$.

В то же время парциальное давление нейтрального газа P_m^r может быть определено как разность между давлением в печи $P_{\text{печи}}$ и давлением электронной компоненты P_e плазмы внешнего столба: $P_m^r = P_{\text{печи}} - n_e k T_e$.

Анализ показывает, что при $P_{\text{печи}} = n_e k T_e$ концентрация нейтральных атомов будет много меньше концентрации ионов: $n_a^{\text{Ar}} \ll n_i^{\text{Ar}}$; при $P_{\text{печи}} > n_e k T_e$ может возникнуть случай, когда концентрация нейтральных атомов аргона n_a^{Ar} будет больше концентрации ионов: $n_a^{\text{Ar}} > n_i^{\text{Ar}}$. Так, при $P_{\text{печи}} = 10 \text{ Па}$ величина концентрации нейтральных атомов аргона n_a^{Ar} примерно на порядок превышает величину концентрации ионов n_i^{Ar} ; при $P_{\text{печи}} < n_e k T_e$ разряд обычно неустойчив, поэтому этот случай не рассматривается. Таким образом, в зависимости от давления в камере электропечи $P_{\text{печи}}$ при работе на холодный анод потери энергии в аргоновой плазме внешнего столба разряда определяются либо только возбуждением ионов плазмообразующего газа (в этом случае потерями энергии на возбуждение нейтральных атомов аргона пренебрегаем), либо двумя видами неупругих столкновений — возбуждением электронами проводимости нейтральных атомов и ионов аргона (потери энергии при этих столкновениях могут оказаться сравнимыми).

В общем случае выходящая из единичного объема плазмы энергия излучения складывается из энергии тормозного излучения $Q_{\text{торм}}$, энергии рекомбинационного излучения $Q_{\text{рекомб}}$ и радиационных потерь энергии в линиях возбужденных атомов и ионов в результате их высвечивания. В отличие от излучений возбужденных атомов и ионов, спектры которых состоят из отдельных спектральных линий с определенными длинами волн, тормозное и рекомбинационное излучения содержат сплошной спектр.

Таким образом, излучение в линиях является основным источником потерь энергии электронами из плазмы внешнего столба разряда с горячим полым катодом. Так как процессы рекомбинации в разреженной резко неравновесной плазме внешнего столба малоэффективны, то можно пренебречь потерями энергии электронами на ионизацию по сравнению с процессами возбуждения атомов и ионов и их высвечивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kinoshita T.** Plasma Electron Beam Source and its Application for Vacuum. Metallurgy // Journal of the Vacuum Society of Japan (Shimkus). 1974. V. 17, B 12. P. 423—437.
2. **Бортничук Н.И., Екжанова Е.Н.** Вакуумные плазменные печи фирмы ULVAK // Электротехнологическая промышленность. Сер. Электротермия. 1973. Вып. 128. С. 27—29.
3. **Плазменная дуга низкого давления с полым катодом как источник теплоты для плавки металлических материалов / Рыкалин Н.Н. и др. // Тр. Моск. энерг. ин-та. 1980. Вып. 462. С. 5—15.**
4. **Вакуумный разряд с полым горячим катодом для плавки титановых сплавов / Каринский В.Н. и др. // Технический уровень, качество, надежность крупного электротермического оборудования. Новосибирск, 1976. Ч. 11. С. 35—42.**
5. **Kashu S., Nishino S., Hayashi G.** An assessment of hollow cathode electron beam melting // Trans. Internal Vacuums Metallurgy Conf. Tokyo, 1976.
6. **Чередниченко В.С., Чередниченко М.В.** Вакуумные плазменные электропечи с полыми катодами: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. 138 с.
7. **Долбилин Е.В., Чурсин А.Ю.** Электронно-плазменные установки. Установки с полым катодом: учеб. пособие. М.: Издательство МЭИ, 2005. 60 с.
8. **Takei H., Ichigami Y.** Hollow cathode discharge melting of Ti-6, Al-4 and Nb-56, Ti-3, 3Zr alloys // Journal of vacuum science and technology. 1971. V. 8. No 6. P. 33—37.
9. **Зырянов С.А.** Нагрев дисперсных частиц в плазменном столбе низкого давления // Электротермические процессы и установки // Меж вуз. сб. науч. тр. Новосибирск: Новосиб. электротехн. ин-т, 1989. С. 31—34.
10. **Чередниченко В.С., Юдин Б.И.** Вакуумные плазменные электропечи: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 586 с.
11. **Комбинированные** электротехнологии нанесения защитных покрытий: монография / Чередниченко В.С. и др. Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2004. 259 с.

12. **Получение** сферических и тонкодисперсных порошков в низкотемпературной плазме / Рыкалин Н.Н. и др. // Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. М., 1973.
13. **Krouchinin A.M., Sawicki A.** The model of internal column of hollow cathode vacuum discharge // IEEE Transactions on Plasma Science June 2001. V. 29. No 03. P. 424—429.
14. **Highly** Ionized Hollow Cathode Discharge / L.M. Lidsky, S.D. Rothleder, D.I. Rose et al. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. No 8. P. 2490.
15. **Delcroix J.L., Minoo H., Trinidad A.R.** Etude de discharges a' cathode creuse a' flux de gaz en regime d'arc // Revue Romaine de Physique. 1968. V. 15. No 5. P. 401—422.
16. **Vander Sude B.** Temperature and density profiles of electrons in a hollow cathode argon—arc discharge // J. Quant Spectrosc Und Radiative Transfer. 1972. V. 12. P. 1497—1516.
17. **Грановский В.Л.** Электрический ток в газе: Установившийся ток / под ред. Л.А. Сена, В.Е. Голанта. М.: Наука, 1971. 544 с.
18. **Спитцер Л.** Физика полностью ионизированного газа: пер. с англ.; под ред. Р.А. Демирханова. М.: Мир, 1965. 212 с.
19. **Абрамов В.А., Тарасов Ю.А.** Излучение цезиевой плазмы // Теплофизика высоких температур. 1964. Т. 2. Вып. 2. С. 160—169.

***В.В. Воеводин, voyevodinv@gmail.com,
ИЭЭ РАН, Москва***

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАКЕТЕ СТУПЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРА

В настоящее время существует достаточно большое количество работ по исследованию возможности применения поверхностного барьерного разряда (ПБР), возникающего под действием высокого напряжения на границе твердого и газообразного диэлектриков, в ступенях предварительной зарядки электрофильтров [1]. Чаще всего для этого используют электродную конфигурацию с дополнительным электродом, перпендикулярным поверхности барьера, который создает электрическое поле, «вытягивающее» ионы из плазмы ПБР. При прохождении очищаемого газа через ионный поток происходят зарядка находящихся в нем загрязняющих частиц и их дальнейшее осаждение в последующих ступенях. Плотность тока, создаваемая таким устройством, достаточна для зарядки частиц микронного и субмикронного размера (PM2.5, < 2,5 мкм), трудно улавливаемых в электрофильтрах классической конструкции. Данные частицы представляют опасность для дыхательных путей человека, поскольку практически не выводятся из организма, а их накопление приводит к серьезным респираторным заболе-

ваниям [2]. Это обуславливает необходимость совершенствования технологий очистки газов в электроэнергетике.

Как показывают исследования, применение ПБР при импульсном высоком напряжении в технологических задачах зачастую позволяет повысить энергоэффективность высоковольтных электротехнологий [3, 4], в том числе и в электрогазоочистке [5]. Повышению эффективности очистки газа способствует повышение однородности распределения потока заряженных частиц в зарядном устройстве [1]. В известной литературе на сегодняшний день отсутствуют данные по пространственно-временному распределению ионного тока, выносимого из плазмы импульсного ПБР электрическим ветром или электрическим полем в устройствах предварительной зарядки, что затрудняет возможность оптимизации их параметров. В настоящей работе сделаны первые шаги в этом направлении.

Используемая в работе электродная система (рис. 1) аналогична используемой в ступенях предварительной зарядки на базе ПБР в компактных электрофильтрах, и представляла собой плоско-параллельную конфигурацию электродов на открытом атмосферном воздухе (влажностью 40 %), барьер — пластина из алюмооксидной керамики (Al_2O_3) толщиной 1 мм. Геометрические параметры электродной системы приведены на рис. 1.

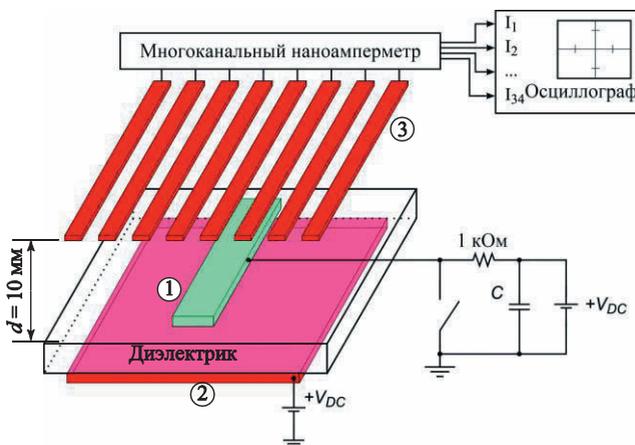


Рис. 1. Конфигурация экспериментальной установки: 1 — коронирующий электрод; 2 — нижний электрод; 3 — вытягивающий электрод.

На нижней стороне барьера располагался широкий электрод 2 из медной фольги, на который подавали постоянный высокий потенциал V_{dc} . На верхней стороне барьера располагалась медная полоса 1, (коронирующий электрод) с рабочей длиной 45 мм и шириной 10 мм, к которой подключался высоко-

вольтный управляемый коммутатор [6], при работе которого формировался разряд по поверхности диэлектрика. Расстояние d между коронирующим электродом 1 и третьим вытягивающим электродом 3 составляло 1 см. Поскольку данные эксперименты являются предварительными, измерения проводили без прокачки загрязненного газа через промежуток d .

Третий электрод 3 располагался параллельно поверхности барьера и был выполнен из 32 тонких (0,5 мм) полосок на поверхности стекловолоконной печатной платы (FR4), ориентированных параллельно электроду 1 и находящихся по обе стороны от него, расстояние между полосами составляло 0,5 мм. Измерительная секция 0 мм располагалась над краем коронирующего электрода. В связи с необходимостью обеспечения надежного заземления элементов наноамперметра при проведении измерений в настоящей работе была использована «перевернутая» схема вытягивания ионов, в которой третий электрод заземляли, а электроды 1 и 2 после формирования разряда находились под постоянным высоким напряжением V_{dc} , таким образом заряд «выталкивался» из плазмы ПБР к третьему электроду. ПБР возникал у края коронирующего электрода на фронте высоковольтного импульса напряжения при замыкании электрода 1 высоковольтным коммутатором на землю. Длительность импульса τ составляла 300 нс. После перехода коммутатора в непроводящее состояние напряжение на электроде восстанавливалось до $\pm V_{dc}$ с постоянной времени $RC = 133$ нс; при достижении напряжения зажигания на спаде импульса формировался обратный разряд ПБР.

Для измерения ионного тока использовали четырехканальный наноамперметр оригинальной конструкции, состоящий из операционного усилителя, диодов, резистора и конденсатора в цепи обратной связи, а также стабилизирующих конденсаторов питания усилителя. Напряжение на выходе усилителя регистрировали через коаксиальный вывод с помощью пробников Keysight N2842A. Коэффициент преобразования составлял 1 nA/mV , диапазон измерения составлял от 0 до ± 7500 нА. Измерительная схема и наноамперметр помещались в экранирующий заземленный корпус, который вместе с измерительной ячейкой находился во внешней клетке Фарадея.

Поскольку при работе импульсного генератора в цепи наноамперметра возникал значительный по амплитуде емкостной ток, решено было использовать импульсную форму питания со столь малой длительностью и высокой скоростью нарастания импульса (генератор работал в режиме однократных импульсов), что позволяло завершиться переходным процессам в измерительном элементе до момента прихода ионного облака.

Измерения сигналов наноамперметра проводили на осциллографе LeCroy Waverunner 104Xi-A 1GHz 10Gs/s одновременно по четырем каналам. Импульс высокого напряжения регистрировали высоковольтным пробником Tektronix P6015A на осциллографе Keysight DSOX2024A 200 MHz 2Gs/s.

К каждому из четырех каналов наноамперметра подключали свою измерительную секцию третьего электрода посредством переключения многопозиционного механического переключателя; оставшиеся секции заземляли. На коронирующем электроде формировались одиночные импульсы напряжения, при этом запуск регистрации ионного тока наноамперметром и подача импульса напряжения были синхронизованы во времени. При каждом импульсе напряжения возникал ионный ток, который регистрировали с помощью осциллографа, для каждого канала (секции) экспериментальная серия составляла не менее 100 импульсов. Затем подключали следующие четыре измерительные секции и измерения повторяли. Таким образом, получались распределения ионного тока по поверхности третьего электрода от времени.

Примеры полученных осциллограмм тока заряженных частиц для участков третьего электрода, расположенных на разном расстоянии от края коронирующего электрода, показаны на рис. 2. Из полученных кривых видно, что ионный ток представляет собой импульсы различной формы, длительности, амплитуды и полярности.

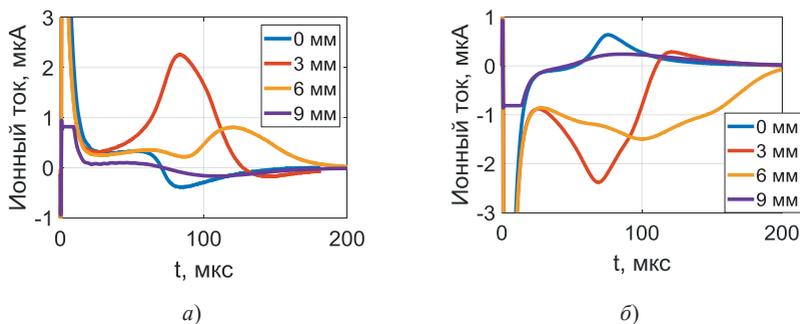


Рис. 2. Осциллограммы ионного тока через измерительные секции на различном расстоянии от коронирующего электрода: а — амплитуда $V_{dc} = +8$ кВ; б — амплитуда $V_{dc} = -8$ кВ

В момент времени $t = 0$ с наблюдается всплеск тока смещения из-за формирования высоковольтного импульса на коронирующем электроде. К моменту времени $t = 20$ мкс переходный процесс в измерительной цепи заканчивается, с этого момента на осциллограмме наблюдается ток, создаваемый движущимся ионным облаком. По мере движения ионного облака в измерительных участках наблюдается рост тока. Из кривых видно, что время прилета ионов для измерительных секций, удаленных на большее расстояние от края электрода и, в свою очередь, от области горения разряда, увеличивается, что может быть связано с увеличением расстояния, которое необходимо преодолеть ионам для достижения этих измерительных секций.

Для определения распределения полного заряда ионов по измерительным участкам был рассчитан интеграл от времени для ионного тока. На рисунке 3 показано распределение заряда по секциям для амплитуды $V_{dc} = \pm 8$ кВ.

Полученные данные показывают, что выносимый в промежуток заряд неравномерно распределен в пространстве: амплитуда тока ионов и полный переносимый заряд различны для каждой измерительной секции. При амплитуде напряжения 8 кВ максимальное значение тока и переносимого заряда смещено на расстояние 4—5 мм от края электрода. При отрицательной полярности напряжения V_{dc} в промежуток выносятся отрицательные ионы. Амплитуда ионного тока и суммарный заряд при этом оказываются выше, а сам заряд распределен несколько более равномерно.

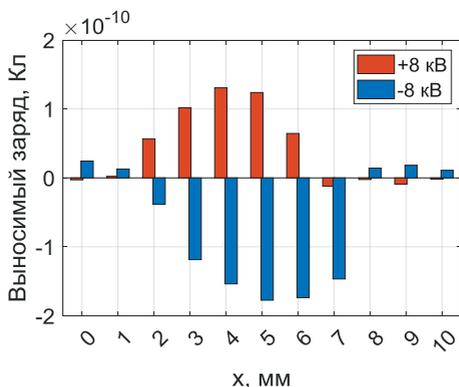


Рис. 3. Распределение полного вытянутого заряда, пришедшего на измерительные секции третьего электрода, расположенные на различном расстоянии от коронирующего электрода

Таким образом, при использовании подобной электродной конфигурации в ступенях предварительной зарядки электрофильтров на базе импульсного ПБР, целесообразно создавать условия, когда в промежуток выносятся отрицательные частицы. Для повышения эффективности зарядки и осаждения частиц загрязнителя необходимо исследовать возможности по выравниванию распределения ионов по газовому промежутку, что является целью дальнейшей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Two-stage** electrostatic precipitators for the reduction of PM 2.5 particle emission / Jaworek A. et al. // Prog. Energy Combust. Sci. 2018. V. 67. P. 206—233.

2. **Efficiency** of Respiratory Protective Equipment in the SARS-CoV-2 Pandemic / Lukanina K.I. et al. // *Nanotechnol Russia*. 2021. V. 16. P. 69—88.
3. **Volume**-surface barrier discharge in dried air in three-electrode system fed by impulse high voltage with nanosecond rise time / M. Malashin et al. // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2016. V. 75, No. 2. P. 24705.
4. **Двухканальный** высоковольтный генератор прямоугольных импульсов для объемного ускорения электрогидродинамических потоков / Мошкунов С.И. и др. // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2016. Т. 59. № 9/3. С. 110—113.
5. **An evaluation** of the Masuda «boxer charger» / C.A.P. Zevenhoven et al. // *J. Electrostat.* 1994. V. 32. No 2. P. 133—155.
6. **Исследование** параметров силовых транзисторов для создания высокочастотных высоковольтных наносекундных коммутаторов / Мошкунов С.И. и др. // *Приборы и техника Эксперимента*. 2018. № 6. P. 62—67.

*А.Б. Баламетов, balametov.aznie@gmail.com, АзНИ и ПИ ИЭ,
А.К. Салимова, afaq.salimova@azerenerji.gov.az, АзНИ и ПИ ИЭ,
Э.А. Баламетов, balametov72@mail.ru, ООО Azerisig,
Т.М. Исаяева, taranaisaeva@rambler.ru, АГУНП, г. Баку*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В последние десятилетия отмечается постоянный рост нелинейных нагрузок, обусловленный, прежде всего, увеличением доли электропотребления бытовым оборудованием и приборами. Это вызывает рост доли высших гармонических составляющих тока и напряжения в электрических сетях. Кроме нелинейных нагрузок, источниками высших гармоник являются нелинейности элементов сети и возможные резонансные режимы их работы. Высшие гармоники тока, помимо снижения качества электроэнергии, вызывают добавочные потери электроэнергии и оказывают влияние на установившийся режим электрической сети. Добавочные потери возникают также вследствие несимметричности параметров элементов сети и несимметричности режимов. В настоящее время эти составляющие потерь обычно не учитываются при расчете потерь электроэнергии. Для оценки влияния высших гармонических составляющих на форму кривой тока и на величину активной и реактивной мощности были проведены эксперименты, рассмотрены разные варианты тока нагрузки: чисто синусоидальная нагрузка и варианты несинусоидального тока нагрузки.

Рост бытовой нагрузки систем электроснабжения сопровождается повышением единичной мощности электроприемников, реактивной составляющей полной мощности, а также увеличением искажения формы токов и нап-

ряжения. В связи с этим актуальность задачи компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах растет. Отсутствие строгой методологии для толкования понятия реактивной мощности привело к появлению различных методов оценки ее величины [1—6]. Однако на сегодняшний день не существует единой точки зрения на решение данной задачи.

Работа электрических сетей в условиях наличия высших гармоник требует анализа установившихся режимов. Одним из способов в условиях учета высших гармоник является проведение расчета для отдельных гармонических составляющих с последующим сложением.

Несмотря на давнее использование термина «реактивная мощность», его внутреннее значение остается расплывчатым и противоречивым. Вопросы на эту тему возрастают с увеличением доли несинусоидальных нагрузок. Рост гармонических составляющих обуславливает необходимость использования различных методов расчета реактивной мощности из-за растущих ошибок в расчетах.

Одной из актуальных проблем для энергосистем является определение реактивной мощности при несинусоидальных режимах. Активная мощность независимо от форм кривых тока и напряжений определяется однозначно. Понятие полной мощности по смыслу является производной от активной мощности и определяется из положения передачи максимально возможной активной мощности при заданных значениях синусоидального тока и напряжения. Реактивная мощность определяется формально через выражения активной и полной мощностей.

Реактивная мощность синусоидального режима в линейной цепи [1]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = UI \cos(\psi_u - \psi_i) = UI \cos \varphi, \quad (1)$$

$$Q = UI \sin \varphi, \quad S^2 = P^2 + Q^2.$$

1. Определение реактивной мощности несинусоидального тока. В общем случае активная мощность определяется как произведение мгновенных значений синусоид различной частоты, для случая идеально синусоидального сигнала расчет ведут только по первой гармонике:

$$P = \sum_k U_k I_k \cos \varphi_k. \quad (2)$$

В электротехнике по аналогии с активной мощностью введено понятие реактивной мощности для несинусоидального режима в линейной электрической цепи:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \Lambda. \quad (3)$$

Формула была введена формально лишь по аналогии с формулой активной мощности, поэтому не отражает физики обменного процесса. Полную мощность и мощность искажения в цепи с периодическими несинусоидальными величинами определяют по формулам [1]:

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \Lambda} \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \Lambda}; \quad (4)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (5)$$

При несинусоидальном и несимметричном режиме это равенство не выполняется. Известные методы выделения и расчета составляющих мощности в зависимости от используемых математических аппаратов можно условно разделить на методы расчета реактивной мощности в условиях несинусоидальности.

Основные понятия и расчетные формулы. В ходе исследований авторы использовали следующие понятия:

— мощность сдвига Q_c (реактивная мощность сдвига) — часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения;

— мощность искажения $Q_{\text{и}}$ — часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием разных по частоте гармоник тока и напряжения;

— неактивная мощность $Q_{\text{н}}$ (полная реактивная мощность) — реактивная мощность, которая характеризует процессы взаимодействия всех без исключения гармоник тока и напряжения.

Существующие методы расчета реактивной мощности в условиях синусоидальной нагрузки можно разделить на несколько способов: спектральные, интегральные и энергопотокосые.

Спектральные методы — определение составляющих мощности через гармонический состав тока и напряжения [3, 4, 6].

Интегральные методы — определение составляющих мощности через интегрирование мгновенных значений тока и напряжения [8, 7, 10].

Энергопотокосые методы — определение реактивной мощности основано на понятии разделения токов [8, 9].

В спектральных методах составляющие мощности определяют через гармонические составляющие токов и напряжений.

Реактивная мощность по С. Буденау. Классической стала теория, предложенная Буденау [3], согласно которой полная мощность S , опреде-

ляемая как произведение действующих значений несинусоидального напряжения U и тока I , содержит три ортогональные составляющие: активную мощность P , реактивную мощность Q и мощность искажения:

$$S^2 = (\Sigma P_k)^2 + (\Sigma Q_k)^2 + (\Sigma D_k)^2. \quad (6)$$

Реактивная мощность для сигнала с k -гармониками определяется как

$$Q = \sum Q_k = \sum_{k=1}^K U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (7)$$

Разложение IEEE. В стандарте IEEE для несинусоидальной ситуации [6] уравнения напряжения и тока делятся на две компоненты; основные и гармонические части:

$$u = u_1 + u_H; \quad i = i_1 + i_H, \quad (8)$$

$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t - \alpha_1), \quad (9)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1), \quad (10)$$

$$u_H = u_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} U_h \sin(h\omega t - a_h), \quad (11)$$

$$i_H = i_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h). \quad (12)$$

Для обеих частей рассчитывают соответствующие среднеквадратичные значения:

$$U^2 = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} u^2 dt = U_1^2 + U_H^2, \quad (13)$$

$$I^2 = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2, \quad (14)$$

$$U_H^2 = U_0^2 + \sum_{h \neq 1} U_h^2 = U^2 + U_1^2, \quad (15)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 + I_1^2. \quad (16)$$

Из-за гармонических составляющих общее гармоническое искажение для напряжения и тока определяется как соотношение между среднеквадратичными значениями гармоник до основной составляющей:

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1}, \quad (17)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1}. \quad (18)$$

Гармонические искажения для напряжения и тока определяется как соотношение между среднеквадратичными значениями гармоник по основной составляющей:

$$P = \frac{1}{KT} \int_{\tau}^{\tau+KT} p \, dt = P_1 + P_H, \quad (19)$$

$$P_{11} = U_1 I_1 \cos \theta_1, \quad (20)$$

$$P_H = P - P_1 = \sum_{h \neq 1} U_h I_h \cos \theta_h. \quad (21)$$

Искажения мощности для напряжения, тока и гармоники определяют с помощью следующих выражений:

— основная реактивная мощность

$$Q_{11} = U_1 I_1 \sin \theta_1; \quad (22)$$

— основная полная мощность

$$S_{11} = U_1 I_1 = \sqrt{P_{11}^2 + Q_{11}^2}; \quad (23)$$

— текущая мощность искажения

$$D_I = U_1 I_H = S_1 (THD_I); \quad (24)$$

— мощность искажения напряжения

$$D_U = U_H I_1 = S_1 (THD_U); \quad (25)$$

— гармоническая полная мощность

$$S_H = U_H I_H = S_1 (THD_I)(THD_U); \quad (26)$$

— мощность гармонического искажения

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2}; \quad (27)$$

— наконец, полная мощность определяется как

$$S^2 = (UI)^2 = S_{I1}^2 + D_I^2 + D_U^2 + S_H^2; \quad (28)$$

— неосновная полная мощность

$$S_N^2 = S^2 - S_1^2 = D_I^2 + D_U^2 + S_H^2; \quad (29)$$

— неактивная мощность

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (30)$$

Реактивная мощность по Д. Шарону [4]. Это определение реактивной мощности основано на понятии реактивного тока, который можно компенсировать оптимальной комбинацией емкостей и индуктивностей. Реактивная мощность выражается как

$$S_Q = Q_{III} = U \sqrt{\sum_{k=1}^K I_k^2 (\sin \phi_k)^2}. \quad (31)$$

Реактивная мощность по вольтамперной характеристике. Интегральную формулу для расчета реактивной мощности ввел М. Илиовиси [7]:

$$Q = \pm \frac{\int_0^T u \frac{di}{dt} dt}{2\pi}. \quad (32)$$

Илиовиси и Маевский [7] используют термины «мощность сдвига Q_c », «мощность искажения Q_H » и «неактивная мощность Q_H ».

Неактивная мощность:

$$\begin{aligned} Q_H &= \frac{1}{2} \left(\frac{4}{T} \int_0^{T/4} (u(t)i(t)dt - P)dt \right) + \left(\frac{4}{T} \int_{T/2}^{3T/4} (u(t)i(t) - P)dt \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{4}{T} \int_{T/2}^{T/4} (u(t)i(t)dt - P)dt \right) + \left(\frac{4}{T} \int_{3T/2}^T (u(t)i(t) - P)dt \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Реактивная мощность может быть определена интегрированием мгновенной мощности по теореме Умова—Пойнтинга

$$-\oint \text{П} \partial s = p_0 + \frac{\partial w}{\partial t} = p = ui. \quad (34)$$

Обменные процессы можно определить по мгновенным значениям мощности и среднему значению P :

$$W_{об} = W^+ \frac{t^-}{T} + W^- \frac{t^+}{T} = P^+ t^- + P^- t^+; \quad Q_{об} = \frac{W_{об}}{T}. \quad (35)$$

2. Результаты моделирования. Подходы IEEE и Буденау анализируются для трех различных случаев с использованием числовых примеров. Основная частота $f_1 = 50$ Гц. Ради простоты степени гармонических составляющих несинусоидальных сигналов ограничены до основной, третьей, пятой и седьмой. В таблице 1 перечислены компоненты значений мощности по Буденау. Результаты моделирования мощности по разложению IEEE показаны в табл. 2.

1. Синусоидальное напряжение и ток:

$$u(t) = 380\sqrt{2} \sin(\omega_1 t); \quad (36)$$

$$i(t) = 24\sqrt{2} \sin(\omega_1 t - 32^\circ). \quad (37)$$

2. Синусоидальное напряжение, несинусоидальный ток:

$$u(t) = 380\sqrt{2} \sin(\omega_1 t). \quad (38)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \left[\begin{array}{l} 24 \sin(\omega_1 t - 32^\circ) + 6 \sin(\omega_3 t - 150^\circ) + 4,8 \sin(\omega_5 t + 310^\circ) + \\ + 4 \sin(\omega_7 t + 330^\circ) \end{array} \right]. \quad (39)$$

3. Несинусоидальное напряжение и ток:

$$u(t) = \sqrt{2} \left[\begin{array}{l} 380 \sin(\omega_1 t) + 76 \sin(\omega_3 t - 80^\circ) + 57 \sin(\omega_5 t + 150^\circ) + \\ + 38 \sin(\omega_7 t + 252^\circ) \end{array} \right]; \quad (40)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \left[\begin{array}{l} 24 \sin(\omega_1 t - 32^\circ) + 6 \sin(\omega_3 t - 150^\circ) + 4,8 \sin(\omega_5 t + 310^\circ) + \\ + 4 \sin(\omega_7 t + 330^\circ) \end{array} \right]. \quad (41)$$

В таблицах 1 и 2 приведены результаты расчета величины реактивной мощности участка цепи различными методами при одинаковых формах приложенного напряжения и протекающего тока.

Таблица 1

Определение реактивной мощности по Будену

Параметр	Для случая		
	1	2	3
S	9120	9696,4	10042
P	7734,2	7734,2	9154,1
Q_1	4832,9	3839,8	3839,8
Q_H	0	0	185,95
D_b	0	3293,2	4110,9

Таблица 2

Определение мощности по стандарту IEEE

Параметр	Для случая		
	1	2	3
S	9120	9696,4	10042
S_{11}	9120	9120	9120
S_H	0	0	886,7
S_N	0	3293,2	4202,6
P	7734,2	7734,2	7664,3
P_{11}	7734,2	7734,2	7734,2
P_H	0	0	-69,47
Q_{11}	4832,9	4832,9	4832,9
D_I	0	3293,2	3293,2
D_U	0	0	2455,6
D_H	0	0	883,99
N	4832,9	5848,2	6487,5
THD_U	0	0	0,2693
THD_I	0	0,3611	0,3611

Определение реактивной мощности сдвига Q_c с использованием геометрической трактовки позволили О.А. Маевскому получить связь этой мощности с площадью вольт-амперной характеристики (ВАХ). На рисунках 1—3 показаны вольт-амперные характеристики ВАХ для случаев 1—3. На рисунке 4 показаны графики тока и напряжения для случая 3.

Реактивная мощность сдвига для случая 1:

$$Q_{\text{маевский}} = \frac{1}{2\pi} \left| \int_0^{2\pi} (u(t)) \left(\frac{d}{dt} i(t) dt \right) \right| = 4,8329 \cdot 10^3.$$

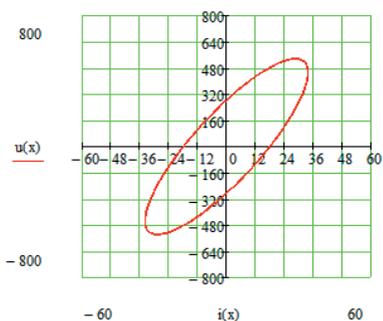


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика для случая 1

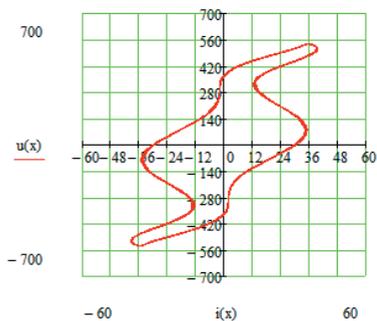


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика для случая 2

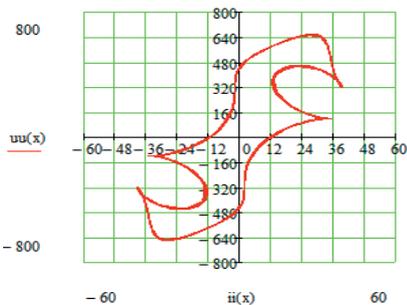


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика для случая 3

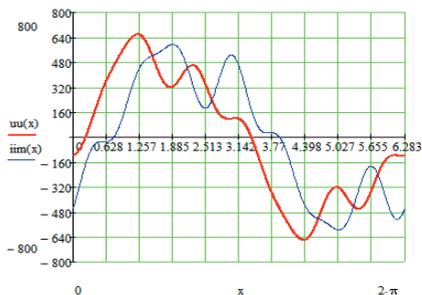


Рис. 4. Графики несинусоидального напряжения и тока для случая 3

Реактивная мощность сдвига для случая 2:

$$Q_{\text{mayevski}} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{2\pi} (u(t)) \left(\frac{d}{dt} i(t) dt \right) \right] = 4,8329 \cdot 10^3.$$

Реактивная мощность сдвига для случая 3:

$$Q_{\text{mayevski}} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{2\pi} (uuu(t)) \left(\frac{d}{dt} iii(t) dt \right) \right] = 4,6076 \cdot 10^3.$$

3. Обсуждение. При синусоидальном напряжении и токе (случай 1), т.е. при отсутствии гармоник напряжения и тока, полная мощность включает в себя только основные компоненты активной мощности и реактивной мощности. Активные мощности IEEE и Буденау равны. Реактивная мощность по Буденау и неактивная мощность IEEE равна основному компоненту реактивной мощности. В синусоидальных условиях общая гармоника искажения напряжения и тока равна нулю. Поэтому результаты неосновных мощностей IEEE равны нулю и, аналогично, мощность искажения Буденау равна нулю.

При синусоидальном напряжении и несинусоидальном токе (случай 2) активные мощности IEEE и Буденау так же, как в случае 1, равны основной составляющей активной мощности ($P = P_1 = 7734,2$ Вт). Реактивная мощность по Буденау равна основной реактивной мощности ($Q = Q_1 = 4832,9$ вар), мощность искажения Буденау равна текущему искажению IEEE, неосновные полные мощности $D_b = D_I = S_N = 3293,2$. Как это видно из табл. 2, наблюдается увеличение полной и неактивной мощности ($S = 9696,4$ В·А, $Q = 5848,2$ вар) и полное гармоническое искажение $THD_I = 0,3611$ из-за существования текущих гармоник.

При несинусоидальном напряжении и токе (случай 3) отличием от случая 2 является наличие мощности искажения напряжения D_V вместо D_I . Для этой новой ситуации напряжения искажения мощности $D_b = D_V = S_N = 2012,5$ и полное гармоническое искажение напряжения $THD_V = 0,2693$. Из-за величин гармоник напряжения компоненты неактивной мощности $N = 6487,5$ вар и полной мощности $S = 10042$ В·А растут.

Как видно из табл. 2, появляются все перекрестные и общие мощности гармонических составляющих. Активная мощность Буденау и IEEE — арифметическая сумма всех гармонических активных мощностей ($P = P_{11} + P_{33} + P_{55} + P_{77} = 7664,3$ Вт). Причиной уменьшения активной мощности в этом случае относительно предыдущего случая являются отрицательные значения неосновных гармонических активных компонентов мощности, которые можно увидеть в деталях в табл. 2. Этот отрицательный поток является результатом разности фаз между соответствующими гармоническими напряжениями и токами. Реактивная мощность Буденау также рассчитывается как арифметическая сумма отдельных гармонических реактивных мощностей, и ее значение зависит от знака отдельной компоненты гармонической реактивной мощности, что объясняет ее увеличение ($Q = Q_{11} + Q_{33} + Q_{55} + Q_{77} = 3028,3$ вар). Кроме того, наблюдается увеличение мощности искажения Буденау ($D_b = 3466,9$ вар).

При несинусоидальном напряжении и токе (случай 3) гармоническая полная мощность $S_n = 886,7$ В·А, гармоническая активная мощность $P_n = -69,47$ Вт, мощность гармонического искажения $D_n = 883,99$; появляется

в дополнение к току искажения ($D_I = 3293,2$ вар) и искажению напряжения ($D_V = 2455,6$ вар) мощность, которая идентична в случаях 2 и 3 соответственно. Кроме того, полная мощность $S = 10042$ В·А и неосновная мощность $S_N = 4202,6$ В·А.

В развитие работ О.А. Маевского мощность сдвига предложено определять через площадь ВАХ [7]. Для определения неактивной мощности в [11], предложено использовать интегралы мгновенной обратной мощности за четверть периода последующим интегрированием мгновенной обратной мощности.

Проведенный анализ методик расчета реактивной мощности при несинусоидальных режимах показывает, что до сих пор не создана строгая общепринятая теория. Значения реактивной мощности, определенные исходя из разных теорий, могут значительно отличаться.

Анализ методов расчета реактивной мощности в несинусоидальных режимах показывает, что серьезно принятая теория еще не разработана. Значения реактивной мощности, определенные из разных теорий, могут существенно различаться. Разнообразие методов расчета реактивной мощности в несинусоидальной сети показывает, что в настоящее время нет единой позиции по этому вопросу. Без четкого определения термина «реактивная мощность» и формализации общепринятого метода расчета невозможно качественно решить проблему компенсации. Поэтому, прежде всего, проблема приближения вида кривых тока и напряжения в сети к синусоидальному режиму должна быть решена, и только тогда необходимо решать вопрос компенсации реактивной мощности.

Выводы.

1. Сравнительный анализ двух концепций реактивной мощности — Буденау и IEEE — показывает преимущества последней.

2. В настоящее время нет окончательного решения о выборе способа расчета величины реактивной мощности в условиях пониженного качества электрической энергии.

3. Без четкого определения термина «реактивная мощность» и формализации общепринятого метода расчета невозможно качественно решить проблему компенсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Теоретические** основы электротехники: В 3 т. Т. 1 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин и др. СПб.: Питер, 2003. 357 с.
2. **Солодухо Я.Ю.** Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч. 1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы М.: Информэлектро, 1987. 50 с.
3. **Budenu C.** Puissance reactives et fictives. Buharest, Rumania: Inst. Romain de l'Energie, 1927.

4. **Sharon D.** Power factor definitions and power transfer quality in non sinusoidal situations // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1996. V. 45. P. 728—733.
5. **Kusters N., Moore W.** On the Definition of Reactive Power Factor of the Supply Systems // IEEE Trans. Power App. Syst. September/October 1980. V. PAS99. P. 1845—1854.
6. **IEEE STD 1459—2010.** IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2010. 40 p.
7. **Маевский О.А.** Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. М.: Энергия, 1978. 320 с.
8. **Возисова О.С., Шелюг С.Н.** Реактивная мощность в несинусоидальных системах // Электроэнергетика глазами молодежи: Тр. VI междунар. науч.-техн. конф., 9—13 ноября 2015, Иваново. В 2 т. Т. 1. Иваново: ИГЭУ, 2015. С. 75—78.
9. **Fryze S.** Active, Reactive and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems. PrzeglądElektrot., No 7, 1931. P. 193—203.
10. **Balامتov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M.** About of reactive power definition in electrical networks. TPE—2004. Second international Conference Technical & Physical Problems in Power Engineering, 6—8 September 2004, Tabriz, Iran. p. 165—169.
11. **Баков Ю.В.** Мощность переменного тока. Иваново: Изд. Ивановского гос. энергетического университета, 1999. 252 с.

*П.В.Осадчий, fggil96@gmail.com, И.И.Надтока, ii_nadtoka@mail.ru,
ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск,
В.В. Тропин, tropin.v09@mail.ru, КубГАУ, г. Краснодар*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЛИНИЯХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Модернизация электрической сети коммунально-бытового назначения (КБН) заключается в том, что высоковольтный силовой трансформатор 10/1 кВ может быть выполнен по простой технологии со схемой обмоток «звезда—звезда», являющейся самой надежной в эксплуатации [1, 2]. Такая структура сети позволяет иметь всего один высоковольтный трансформатор на местности с радиусом действия 1,0 км и более (именно такие расстояния наиболее востребованы при проектировании и реконструкции распределительных сетей КБН), особенно в пригородах и сельской местности. Такое схемное решение (рис. 1) предполагает полное устранение тока нулевой последовательности (НП) в обоих трансформаторах и линиях сети КБН, поскольку электроприемники подключаются к плечам участка пониженного уровня напряжения 220 В низковольтной части сети, нейтраль которой выполняет только защитную функцию.

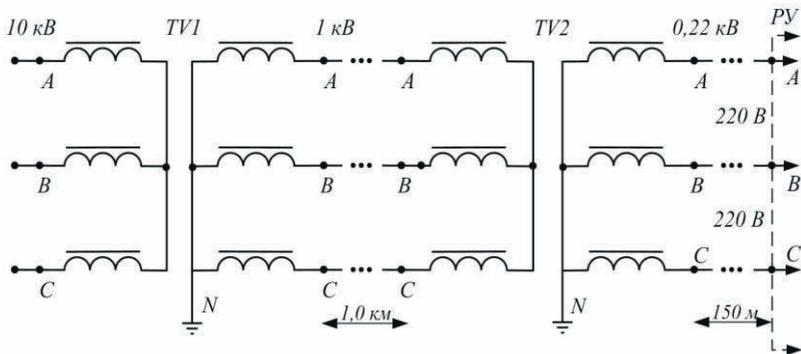


Рис. 1. Схема технического решения, в котором не используется схема соединения «треугольник»

Исследованы дополнительные потери мощности с целью их сравнения в схемных структурах сети КБН — назовем их «классическая» (трансформатор 10/0,4 кВ) и «модернизированная» (рис. 1). Анализ проводили на основе метода преобразования координат симметричных и ортогональных составляющих токов трехфазных цепей [3]. Только с помощью этого метода удалось относительно просто получить необходимые для расчетов мощности потерь величины квадратов модулей векторов тока нулевой I_0 , обратной I_2 и прямой I_1 последовательностей сети «классической» структуры в зависимости от активных I_a и реактивных I_r составляющих токов каждой фазы электроприемников потребителей. Если ввести следующие обозначения:

$$M = (I_{Aa} - I_{Ba})^2 + (I_{Ba} - I_{Ca})^2 + (I_{Ca} - I_{Aa})^2 + (I_{Ar} - I_{Cr})^2 + (I_{Br} - I_{Ar})^2 + (I_{Br} - I_{Cr})^2;$$

$$П = 2\sqrt{3} (I_{Ar}(I_{Ba} - I_{Ca}) + I_{Br}(I_{Ca} - I_{Aa}) + I_{Cr}(I_{Aa} - I_{Ba}));$$

$$\Phi = (I_{Ar} + I_{Br} + I_{Cr})^2 + (I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca})^2 = (I_{ABr} + I_{BCr} + I_{CAr})^2 + (I_{ABa} + I_{BCa} + I_{CAa})^2,$$

то квадраты модулей указанных векторов токов нулевой I_0 , прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей можно записать следующим образом:

$$I_0^2 = \frac{1}{18}(M + П); \quad I_2^2 = \frac{1}{18}(M - П); \quad I_1^2 = \frac{1}{9}\Phi.$$

Коэффициент $k_{П}$ превышения потерь мощности, вызванных несимметрией токов в линии распределительной сети, определяется как отношение

мощности потерь, вызванных токами всех последовательностей, к мощности потерь, вызванных только током прямой последовательности:

$$k_{\Pi} = \frac{(I_0^2 + I_2^2 + I_1^2)3R + I_0^2(9R_N)}{I_1^2(3R)} = 1 + \frac{(I_0^2 + I_2^2)}{I_1^2} + \frac{I_0^2}{I_1^2} \left(3 \frac{R_N}{R}\right),$$

где R — активное сопротивление проводников каждой фазы линии и трансформатора; R_N — активное сопротивление нейтрального провода. Если считать величину R_N равной величине R , то

$$k_{\Pi} = 1 + \frac{I_2^2}{I_1^2} + 4 \frac{I_0^2}{I_1^2},$$

и используя принятые выше обозначения:

$$k_{\Pi} = 1 + 2,5 \frac{M}{\Phi} + 1,5 \frac{\Pi}{\Phi}. \quad (1)$$

Кроме того, надо учесть дополнительные потери мощности, вызванные несимметрией токов в обмотке со схемой «треугольник» на высокой стороне трансформатора «классической» структуры сети, где присутствуют все симметричные составляющие токов и прямой, и обратной, и нулевой последовательностей. Поэтому с учетом выявленной выше закономерности

$$I_{2AB}^2 + I_{0AB}^2 = \frac{1}{9}M, \text{ коэффициент превышения потерь мощности в обмотке}$$

со схемой «треугольник» «классической» структуры сети

$$k_{\Pi\Delta} = 1 + \frac{M}{\Phi}. \quad (2)$$

Аналогично определены квадраты модулей векторов токов обратной и прямой последовательностей и коэффициент превышения потерь мощности $k_{\Pi\Delta}$ проводников фаз A, B, C трехпроводных линий двух участков повышенного и пониженного уровней напряжения низковольтной части «модернизированной» структуры распределительной сети КБН при тех же исходных данных для активных и реактивных токов фаз электроприемников нагрузки, что и для «классической структуры»:

$$I_{2\Delta\Delta}^2 = \frac{1}{6}(M - \Pi); \quad I_{1\Delta\Delta}^2 = \frac{1}{3}\Phi;$$

$$k_{\Pi\Delta} = 1 + 0,5 \frac{M}{\Phi} - 0,5 \frac{\Pi}{\Phi}. \quad (3)$$

С помощью формул (1)—(3), с позиции относительных величин дополнительных энергетических потерь, можно сравнить эффективность «классической» и «модернизированной» структур распределительной сети КБН. Для наглядности это сравнение может быть значительно упрощено, если использовать известное из практики условие относительного равенства коэффициентов реактивной мощности каждой фазы электроприемников коммунально-бытовых потребителей, а в этом случае, что легко установить расчетом, $\Pi = 0$. Таким образом, именно для распределительных сетей КБН согласно (1) коэффициент k_{Π} превышения дополнительных потерь мощности, вызванных несимметрией токов в сети «классической» структуры, будет равен

$$k_{\Pi} = 1 + 2,5 \frac{M}{\Phi}.$$

В свою очередь коэффициент превышения (дополнительных) потерь мощности $k_{\Pi\Pi}$ в линиях и проводниках трансформаторов двух участков повышенного и пониженного уровней напряжения низковольтной части «модернизированной» структуры согласно (3) будет равен

$$k_{\Pi\Pi} = 1 + 0,5 \frac{M}{\Phi}.$$

Отсюда следует важный теоретический вывод — сеть КБН модернизированной структуры имеет в 5 раз меньшие относительные величины дополнительных потерь мощности, вызванные несимметрией токов в линиях и проводниках трансформаторов, и в 2 раза меньшие относительные величины дополнительных потерь мощности на высокой стороне высоковольтного трансформатора [1].

Для подтверждения теоретических результатов проведены экспериментальные исследования распределительной сети КБН «модернизированной» структуры. На рисунке 2 представлена исполнительная схема первичных электрических соединений ВЛ 0,4 кВ участка повышенного уровня напряжения низковольтной части распределительной сети КБН, питаемой от ТП-1/192 с трансформатором ТМ-100/10 (схема обмоток «звезда—звезда с нейтралью»; номинальный ток 150 А, $u_{кз} = 5,5\%$), подключенным к ВЛ-10 кВ Ф-192 ПС «Лысогорская».

Первичная обмотка исследуемого разделительного трансформатора ТМ-25/0,4/0,22 подключена к сети 0,4 кВ, а вторичная обмотка с междуфазным напряжением 220 В подключена к низковольтной трехфазной трехпроводной распределительной сети КБН с двухпроводными отпайками к потребителям на опорах №№ 17, 18, 20, 23, 24. Трансформатор ТМ-25/0,4/0,22 со

схемой соединения обмоток «звезда—звезда с нейтралью» установлен на опору № 17, его номинальный ток нагрузки составляет 60 А; $i_{кз} = 4,5\%$. Эксперименты с данным трансформатором проводили с целью определения токов короткого замыкания с помощью прибора ИФН-200, определяющего величины сопротивлений петли «фаза—нуль» и величины токов коротких замыканий. Так, для первичной обмотки 0,4 кВ по цепи «фаза—нуль» напряжением 220 В токи коротких замыканий имели следующие значения по трем фазам: 370, 360, 340 А; а для вторичной обмотки 220 В по цепи «фаза—нуль» токи коротких замыканий имели значения: 429, 426, 423 А; по цепи «фаза—фаза» на линейном (междуфазном) напряжении 220 В токи коротких замыканий имели значения 620, 630, 620 А.

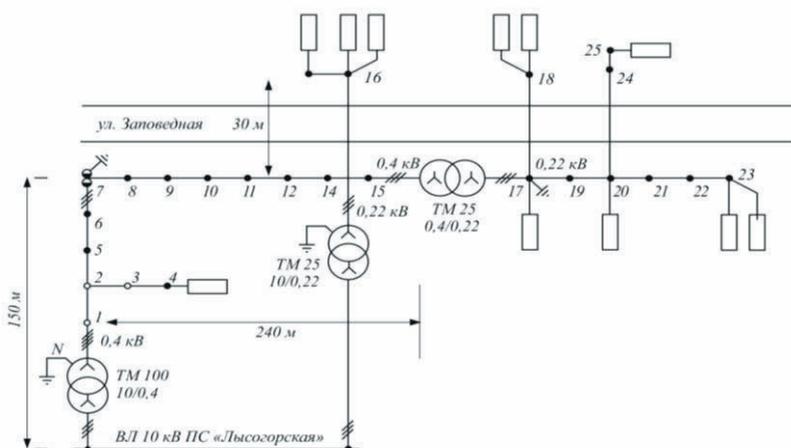


Рис. 2. Исполнительная схема первичных электрических соединений ВЛ 0,4 кВ участка повышенного уровня напряжения и ВЛ 0,22 кВ участка пониженного уровня напряжения низковольтной части распределительной сети КБН

Наличие двух участков в низковольтной распределительной сети КБН, кроме возможности более эффективного использования высоковольтного трансформатора и сокращения длины высоковольтных линий [5], дает еще возможность решить проблему электрической индукции части высокого напряжения 10 кВ в низковольтную обмотку питающего трансформатора глубокого ввода 10/0,22 кВ.

Важной задачей является обеспечение допустимых значений напряжений и токов прикосновения в соответствии с требованиями государственного стандарта ГОСТ 12.1.038—82 «Система стандартов безопасности труда.

Электробезопасность», нормирующего предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме бытовых электроустановок напряжением до 1000 В частотой 50 Гц.

Выполнены эксперименты с определением напряжения и тока прикосновения с эквивалентированием тела человека резистором с сопротивлением 1 кОм, что рекомендует указанный выше ГОСТ 12.1.038—82. Работы проводили в двух режимах: с изолированной нейтралью (IT) и с заземленной нейтралью (TN).

Эти эксперименты характерны тем, что в сети IT непосредственно у потребителя на расстояниях от 10 до 122 м от трансформатора напряжения прикосновения относительно «земли» на резисторе 1 кОм достигают 155 В на одном проводнике и несколько меньше (97 В) — на другом. Величины токов прикосновения и по резистору с сопротивлением 1 кОм, и по КЗ больше величины тока «удержания» 6,0 мА для всех используемых расстояний от трансформатора и 10 м, и 122 м, но не более 12,0 мА. В этом случае критерием выбора УЗО будет величина тока прикосновения, так как напряжение прикосновения формируется током прикосновения и эквивалентным сопротивлением тела человека, в частности, 1,0 кОм, и, следовательно, не превышает 12,0 В. В таблице 1 ближайшим нормируемым значением аварийного тока является величина 25,0 мА, поэтому допускается временная задержка в срабатывании УЗО величиной 1,0 с.

Экспериментальное определение тока замыкания на землю в системе с заземленной нейтралью (TN) также проводили с учетом эквивалентного сопротивления тела человека 1,0 кОм. Значение сопротивления растекания тока на землю в месте заземления нейтрали трансформатора (опора № 17) не превышало 2,1 Ом во все временные периоды измерений. Полученные результаты позволяют утверждать, что при попадании человека под напряжение фазы номинальной величиной 127 В по его телу будет протекать ток порядка 100 мА, а при касании проводника фазы на землю ток КЗ будет порядка 1,0 А. В таком случае согласно табл. 1 необходимо применение УЗО со временем срабатывания 0,1 с.

Для сравнения величин отклонений напряжения сети до модернизации и после в соответствии с методикой, предложенной в [6], проводили еженедельные утренние (9:00), дневные (14:00) и вечерние (18:00) измерения напряжения прямой последовательности на опоре № 17 (см. табл. 1). Анализ результатов позволяет утверждать, что после модернизации сети отрицательное отклонение напряжения уменьшилось в среднем на 7,5 В, а среднеквадратическое значение отклонения напряжения — на 3,5 В.

Выборочные (еженедельные с 03.07.2020 г.) измерения уровня ночного напряжения в сети хутора Тельмана показали, что его средние значения ле-

том на 10,0 В превышают дневные; осенью — на 8,5 В; зимой — на 3,5 В; весной — на 6,0 В.

С целью оценки величины дополнительных потерь мощности в сети того же хутора проводили, наряду с напряжением, еженедельные измерения токов четырехпроводной линии 0,4 кВ и трехпроводной линии 0,22 кВ. Результаты измерений приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

Результаты измерения напряжений прямой последовательности

Год	Средние значения напряжений прямой последовательности и среднеквадратические отклонения, В					
	Зима			Лето		
	Утро	День	Вечер	Утро	День	Вечер
2019	<u>201,0</u>	<u>203,3</u>	<u>198,2</u>	<u>204,6</u>	<u>204,1</u>	<u>202,0</u>
	8,1	7,1	7,4	7,2	7,5	7,3
2020	<u>207,6</u>	<u>208,0</u>	<u>207,0</u>	<u>212,3</u>	<u>212,0</u>	<u>210,0</u>
	4,1	4,2	3,4	4,1	4,4	3,6
2021	<u>206,4</u>	<u>207,7</u>	<u>206,1</u>	<u>211,2</u>	<u>211,8</u>	<u>210,1</u>
	4,1	4,1	4,5	3,4	4,1	3,9

Таблица 2

Результаты измерения токов в линии 0,4 и 0,22 кВ

Год	Средние значения тока прямой последовательности и тока нейтрали в линии 0,4 кВ (А)					
	Зима			Лето		
	Утро	День	Вечер	Утро	День	Вечер
2019	21/5,1	15/5,0	22/4,3	18/5,3	14/4,7	18/5,1
2020	7,5/2,0	5,1/1,5	9,0/2,3	9,1/2,1	4,1/1,1	9,6/2,3
2021	11/2,5	7,1/2,0	12/2,6	8,8/2,4	6,1/2,0	7,5/2,1
	В линии 0,22 кВ					
2020	13/3,5	9,0/2,7	16/4,0	16/3,6	7,2/2,0	7,0/4,0
2021	19/4,2	12/3,3	20/3,5	15/4,2	11/3,5	13/3,6

Анализ этих результатов показывает, что средние значения коэффициента тока нулевой последовательности (НП), определенного по величине как третья часть тока нейтрали, в четырехпроводной сети 0,4 кВ составили ве-

личину 0,18, а коэффициента тока обратной последовательности, определенного по величине как 60%-ная часть максимальной разности между токами фаз, в трехпроводной сети — 0,20. Поэтому относительная величина дополнительных потерь мощности в данной «классической» сети 0,4 кВ оценивается величиной 17 %, а в «модернизированной» сети — 4,0 %. Соотношение между ними практически совпадает с теоретическими результатами, что в целом указывает на значительные энергетические преимущества «модернизированной» структуры сети перед «классической». Еще одним дополнительным преимуществом предлагаемой структуры сети является возможность снижения коммерческих потерь, что подтверждается данными системы автоматизированного учета за два года (в 2019—2020 гг.), когда была внедрена «модернизированная» структура сети вместо «классической».

Выводы. В результате экспериментальных исследований низковольтной распределительной сети КБН «модернизированной» структуры установлено следующее:

1) качество электроэнергии в распределительной сети 0,22 кВ выше, чем было до модернизации, при работе от сети с нейтралью, питающей те же электроприемники;

2) модернизированная сеть 0,22 кВ отвечает требованиям электробезопасности и в нормальном, и аварийном режимах;

3) сеть с изолированной нейтралью предпочтительнее, поскольку «уставки» РЗ не зависят от сопротивления конкретного грунта электроустановки, а токи прикосновения и КЗ не зависят от конструктивных особенностей как искусственных, так и естественных металлических заземлителей;

4) практически 70 % дополнительных потерь мощности в распределительной сети КБН создает ток НП, поэтому устранение тока НП в сети КБН является важным направлением повышения ее эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Надтока И.И., Осадчий П.В., Тропин В.В.** Сравнение потерь мощности в двух структурах распределительной электрической сети коммунально-бытового назначения // Промышленная энергетика. 2021. № 4. С. 20—28.
2. **Надтока И.И., Осадчий П.В., Тропин В.В.** Анализ схемных решений модернизации сельской распределительной сети жилищно-коммунального назначения // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 3. С. 75—84.
3. **Тропин В.В.** Использование метода преобразования координат в теории компенсации реактивной мощности // Изв. вузов. Электромеханика. 1993. № 6. С. 66—67.
4. **Патент** на полезную модель № 134709РФ. МПКН2J 3/00. Электрическая сеть с нейтралью / И.И. Надтока, В.И. Надтока, В.В. Савиных и др. // Заявл. 12.04.2013. Опубл. 08.07.2013.

5. **Князев В.** Энергоэффективная технология передачи электроэнергии на напряжении 0,95 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 5. (38). С. 36—39.
6. **Niebrzydowski J.** Estimation of asymmetry distribution and current imbalance coefficients the rural power networks by the method of central moments of distribution / J. Niebrzydowski // Zesz. Nauk. Pbialost. Elek. 1992. No 11. P. 21—43.

*М.В. Пантюхин, p.mark 10@mail.ru,
А.И. Рудаков, rud-38@mail.ru,
М.Р. Мухаматяров, vcc_99@mail.ru,
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПИТАНИЯ

Исследования в области электромагнитных полей и разработки беспроводных способов передачи энергии на расстояние стали актуальными в связи со старением токопроводящих проводников и необходимостью их замены в будущем [5—7].

Беспроводная передача энергии стала возможна благодаря методу электромагнитной индукции [8, 9]. Этот метод эффективен в пределах одного метра и требует высокого коэффициента связи на дальние расстояния, что делает невозможным передачу энергии свыше двух метров без высоких потерь. Эти недостатки позволяет сгладить магнитно-резонансный метод передачи энергии, имеющий свои особенности [2—4].

Использование колебательного контура с последовательным подключением индуктивности и емкости при правильной настройке и сборке системы позволяет достичь резонанса только с потерями внутреннего сопротивления источника энергии (рис. 1) [1]. При этом выходная мощность системы (ее суммарная эффективность) немного упадет, а ее резонанс не изменится. Из этого следует, что для увеличения выходной мощности необходимо повысить резонансную эффективность между резонатором и приемником.

Для увеличения резонансной эффективности необходимо максимально приблизить значение высокочастотного излучения между приемником и передатчиком (резонатор) к единому, одинаковому значению. Этого можно достигнуть путем использования определенного диаметра провода на ка-

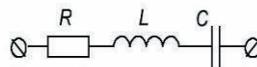


Рис. 1. Последовательный колебательный контур

тушках, количества витков, длины и диаметра каркаса. Применение более подходящих материалов и использование дополнительных средств (тор, диполь Тесла, Герца, бифиляр катушек) позволяют повысить эффективность и сформировать пучность передачи электроэнергии. Благодаря пучности передачи, энергия будет целенаправленно идти к адресату с минимальными потерями на рассеивание. Дело в том, что волны, идущие от резонатора, отражаются от конца и складываются с последующей.

Максимальная пучность будет достигнута, когда длина провода будет равна одной четверти длины волны, исходящей от источника. Расстояние передачи ограничено, и для ее регулировки требуется подключение дополнительных емкостей. В таком случае установка будет работать либо как нагрузка с положительным реактивным сопротивлением (режим индуктивности), либо как нагрузка с отрицательным сопротивлением (емкостной режим) и влиять на длину распространения волны. Работа установки в емкостном режиме нежелательна, т.к при большой емкости уменьшится добротность всей системы, что снизит КПД установки.

Типичный график зависимости выходной мощности от сопротивления нагрузки и коэффициента связи приведен на рис. 2.

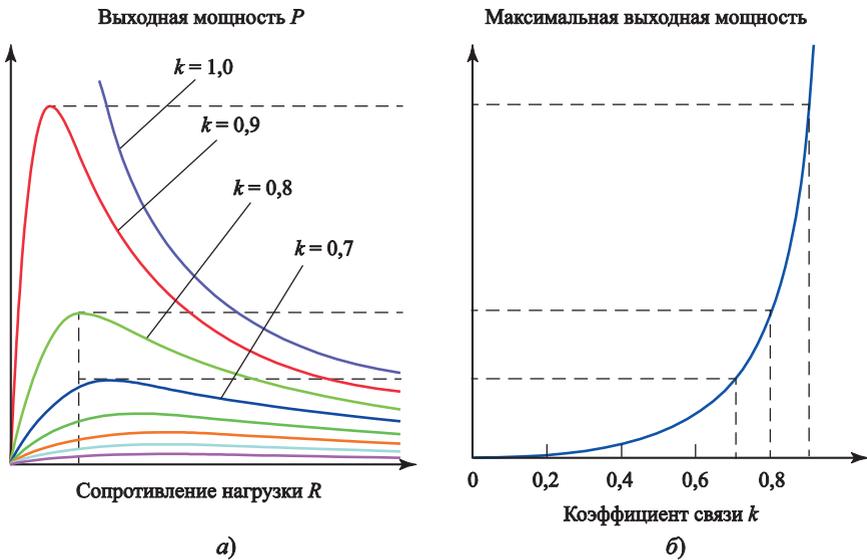


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от сопротивления нагрузки (а) и коэффициента связи (б)

Из графика следует, что для передачи энергии на большие расстояния необходимо учесть и компенсировать возрастание сопротивления нагрузки и падение коэффициента связи с максимальным улучшением показателя добротности, так как даже за один полупериод колебаний КПД передачи начнет стремительно возрастать.

Для увеличения коэффициента связи необходимо снизить расстояние между резонатором и приемником, что недопустимо в нашем случае, или использовать бифилярный способ намотки катушек с максимальным увеличением ее частоты, что позволит повысить эффективность системы при снижении КПД. Снижение КПД (и снижение эффективности системы) возникнет из-за использования бифиляра и появления паразитной емкости, вследствие чего упадет добротность всей системы. Компенсировать данный провал позволяет увеличение частоты резонанса приемника и резонатора. При значительном увеличении частоты и мощности установок появляется серьезная опасность для здоровья человека.

Увеличение коэффициента связи примерно в два раза позволяет повысить показатели выходной мощности примерно на 20—25 %. Увеличение коэффициента связи примерно в четыре раза приводит к повышению показателей выходной мощности на 30—35 %. Необходимо отметить, что увеличение коэффициента связи эффективно только до определенного момента. Большой рост коэффициента связи несет в себе трудности в изоляции между катушками и высокой опасности их пробоя.

Общая формула для расчета максимальной выходной мощности с учетом сопротивления нагрузки и коэффициента связи:

$$\frac{P_{\max}}{R} = (1 - k^2) \omega L,$$

где R — сопротивление нагрузки; k — коэффициент связи системы; L — индуктивность системы; ω — резонансная частота колебаний.

Общая формула для добротности системы

$$Q = \frac{w_0 W}{P_d} = \frac{2\pi f_0 W}{P_d},$$

где w_0 — резонансная круговая частота колебаний; f_0 — резонансная частота колебаний; W — энергия, запасенная в колебательной системе; P_d — рассеиваемая мощность.

Помимо выходной мощности коэффициент связи позволяет увеличить скорость передачи энергии при пуске системы (рис. 3). На верхнем (первом) графике коэффициент связи в 2 раза выше, чем на нижнем (втором); видно, что скорость передачи энергии на первом графике выше, чем на втором.

На кафедре «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений (ЭХП)» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» разработана установка беспроводной передачи электрической энергии (качер Бровина). Его принципиальная схема и фотографии приведены на рис. 4 и 5.

Параметры установки следующие. Первичная катушка R1 — 4,3 кОм; T1 — КТ819ВМ; L1 — 5,5 витков; L2 — 860 витков. Вторичная катушка: диаметр трубки $D_{тр} = 50$ см; диаметр катушки $D_{кат} = 22$ см; диаметр провода по меди (без лака) $D_{пров} = 0,19$ мм; диаметр провода по лаку (1 слой) $D_{пров} = 0,22$ мм.

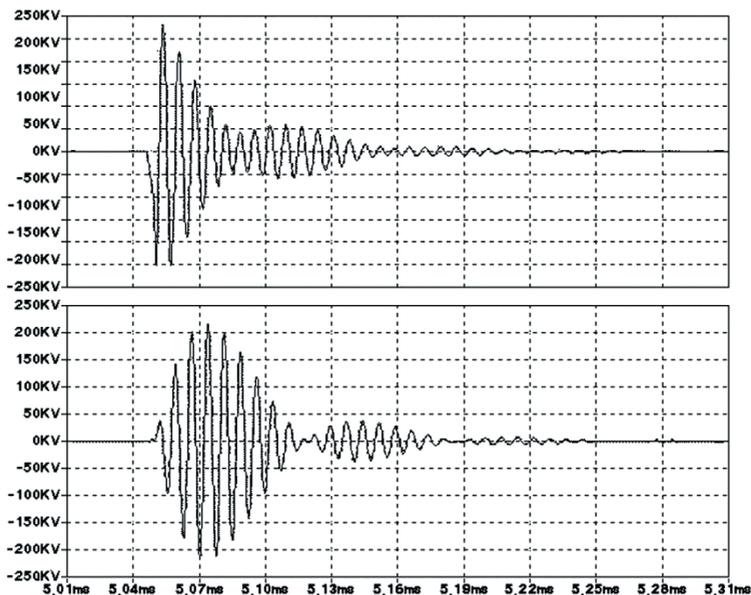


Рис. 3. Зависимость напряжения на катушке от времени передачи энергии

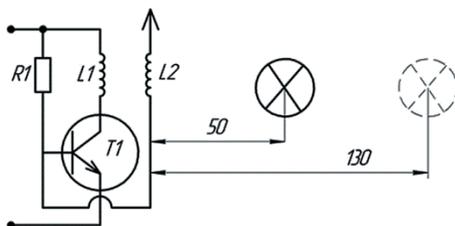


Рис.4. Схема качера Бровина

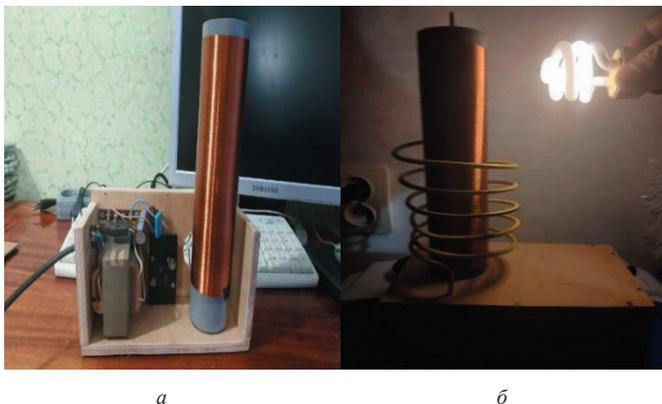


Рис. 5. Качер Бровина: *а* — общий вид; *б* — в работе

Проведенные экспериментальные исследования показали, что установка беспроводной передачи электрической энергии (качер Бровина) работоспособна. Отмечено, что при расстоянии между второй катушкой и негорящей лампой, равном 5 см, лампа начинает гореть. При расстоянии между второй катушкой и лампой, равном 13 см, лампа гаснет.

После небольших доработок используемый принцип беспроводной передачи электрической энергии может найти применение в сетях промышленного питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильясов И.В., Рудаков А.И., Сираев Л.И.** Применение явления резонанса в электроэнергетике для повышения энергоэффективности генерирующих систем // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: Матер. IV всерос. науч.-техн. конф. студ., маг. и асп. Изд. ТГУ—Тольятти, 2016. С. 104—107.
2. **Однопроводная** и беспроводная передача энергии / Н.В. Косинов и др. // Новая энергетика. 2003. № 4. 2003. С. 2—7.
3. **Беспроводные** сенсорные сети: учеб. пособие для вузов / Б.Я. Лихтциндер, Р.В. Киричек, Е.Д. Федотов и др., под общ. ред. Б.Я. Лихтциндера. // М.: Изд-во: Горячая линия—Телеком. 2020. 235 с.
4. **Рудаков А.И., Сидоров А.Е., Ильясов И.В.** Использование свободной энергии в генерирующих системах электроснабжения небольших объектов // В сб.: Наука. Технология. Производство — 2019: Моделирование и автоматизация технологических процессов и производств, энергообеспечение промышленных предприятий: Материалы Всероссийской науч.-метод. конф., посвященной 100-летию образования Республики Башкортостан. 2019. С. 44—48.
5. **Способы** беспроводной передачи энергии. [Электронный ресурс] — <http://electric.info/main/fakty/918-sposoby-besprovodnoy-peredachi-elektroenergii.html>

6. **Бараш Л.** Беспроводная передача энергии / Наука и технологии. Наука. [Электронный ресурс] — <http://www.membrana.ru/particle/2007>.
7. **Беспроводная** передача энергии. [Электронный ресурс] — <http://www.scorcher.ru/art/theory/cosinov/tesla.htm>
8. **Индукционная** передача энергии. [Электронный ресурс] — <http://altinfoyog.ru/index.php/energetika/analiz/ipe.html>
9. **Индукционная** передача энергии. [Электронный ресурс] — http://hiend-flow.do.am/publ/obzory_tekhnologij/indukcionnaja_peredacha_energii/2-1-0-1

А.Е. Немировский, a.e.nemirovsky@mail.ru,

Г.А. Кичигина, janedaw@mail.ru,

И.Ю. Сергиевская tanak04@mail.ru,

Д.Н. Мищенко, mishchenkodn@yogu35.ru,

Вологодский государственный университет, г. Вологда

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА УСТРОЙСТВ СУШКИ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОМ И ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВАХ

Состояние эксплуатационной надежности электродвигателей (ЭД) в сельскохозяйственном производстве продолжает оставаться на неудовлетворительном уровне [1]. Изучение и обобщение опыта ведущих научно-исследовательских институтов показали, что до 23 % ЭД отказывают по условиям окружающей среды [2, 3]. Если проанализировать причины аварий по механизмам, то увидим, что наибольшее их число приходится на ЭД кормораздатчиков и навозоуборочных транспортеров. Это и понятно, так как ЭД этих механизмов испытывают наибольшее воздействие повышенной влажности и агрессивности среды.

Исследованиями УНИИМЭСХ установлено, что благодаря внедрению более надежных средств защиты доля ЭД, вышедших из строя из-за обрыва фазного провода, снизилась с 40,7 до 17 %; из-за перегрузок — с 22,8 до 15,7 %. В то же время доля вышедших из строя ЭД из-за разрушения изоляции обмоток, обусловленного их увлажнением, увеличилась в 1,6 раза. Исследования НПО «Нечерноземмагромаш» дают до 30 % отказов ЭД из-за увлажнения обмоток. В итоге увлажнение изоляции стоит на одном из первых мест по значимости среди причин повреждений ЭД (после аварийных режимов).

Разрушающее действие среды сельскохозяйственных помещений на изоляцию обмоток ЭД обусловлено высокими значениями параметров содержания агрессивных газов и влажности воздуха; длительными простоями ЭД; несоответствием исполнения ЭД условиям среды.

Агрессивная среда сельскохозяйственных помещений совместно с увлажнением усиливает негативное воздействие на изоляцию ЭД. Увлажненный ЭД в агрессивной среде представляет собой гальванический элемент. Одна из пластин такого элемента — медная обмотка, другая — железо статора. Электролитом служит образующаяся во влажной агрессивной среде смесь различных кислот. Сероводородная и угольная кислоты получаются при взаимодействии влаги с H_2S , CO_2 ; другие кислоты могут образоваться при гидролизе и разложении изоляции в воде. При этом протекают химические реакции, характерные для гальванической пары, и медный провод разрушается. Последнее обстоятельство приводит к обрыву обмотки и витковому замыканию. Обрыв провода в обмотке редко выделяют в самостоятельное повреждение и обычно учитывают в числе прочих. Таким образом, число повреждений ЭД из-за воздействия влажной агрессивной среды реально возрастает, если учесть отказы обмотки, связанные с обрывами и витковыми замыканиями при образовании гальванической пары.

Увлажнение приводит к возникновению эффекта «распаривания» изоляции после пуска ЭД в работу. Включение ЭД сопровождается разогревом влажной изоляции. Влага в порах и капиллярах расширяется и дополнительно шунтирует диэлектрик. Величина сопротивления изоляции резко падает, может произойти пробой. Чем меньше величина сопротивления перед включением ЭД, тем сильнее эффект «распаривания» и вероятный отказ двигателя. Если аварии удалось избежать, то при дальнейшей работе ЭД изоляция подсыхает.

Следует отметить, что ситуация с ЭД в оросительных системах Крыма и Кубани, в химической и нефтегазовой промышленности весьма схожа с положением дел с ЭД в сельскохозяйственном производстве [4, 5]. Таким образом, без периодической подсушки ЭД в сельскохозяйственном и промышленном производствах обойтись невозможно.

Задача оптимального выбора устройств сушки (УС) изоляции ЭД сводится к подбору УС для конкретных ЭД с минимальными затратами на одну операцию сушки, к подбору УС для отдельного сельхозпредприятия с определенной структурой парка ЭД и минимальными суммарными затратами, к подбору УС для отдельного сельхозпредприятия с минимальным влиянием на технологический процесс. Целевую функцию максимизации годового экономического эффекта при минимизации технологического ущерба запишем в виде

$$\mathcal{E}(K_j, H_j, S_i, T_{ij}) \rightarrow \max \text{ при } Y(\tau_j) \rightarrow \min,$$

где K_j — капитальные вложения на приобретение или создание j -го УС; H_j — эксплуатационные расходы; S_i — структура парка i -х ЭД; T_{ij} —

продолжительность сушки i -го ЭД j -м устройством; τ_j — продолжительность перерыва технологического процесса при использовании j -го устройства.

Основой решения задачи является экономико-математическая модель с блочной структурой, включающая три основных блока (рис. 1). Алгоритмы выполнения расчетов в первом и втором блоках показаны на рис. 2, а в третьем — на рис. 3.

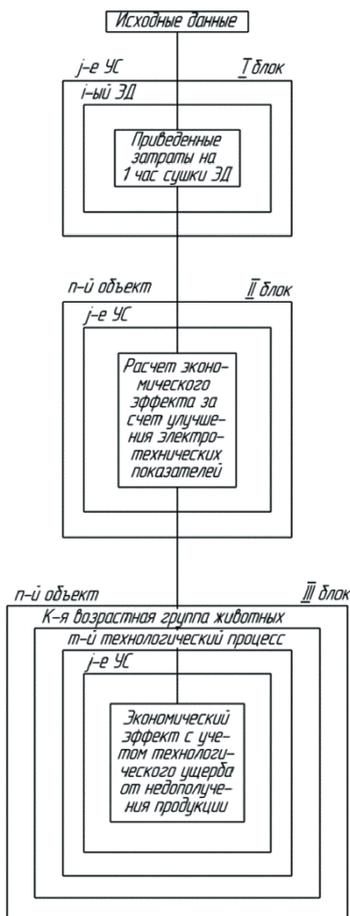


Рис. 1. Структура экономической модели для расчета эффекта от применения устройств сушки

Первый блок содержит для каждого j -го УС и i -го по мощности ЭД расчеты капитальных вложений, амортизационных отчислений, издержек по эксплуатации, расхода электроэнергии в УС, транспортных расходов по доставке УС или ЭД к месту сушки, дополнительных затрат у потребителя по демонтажу и монтажу ЭД.

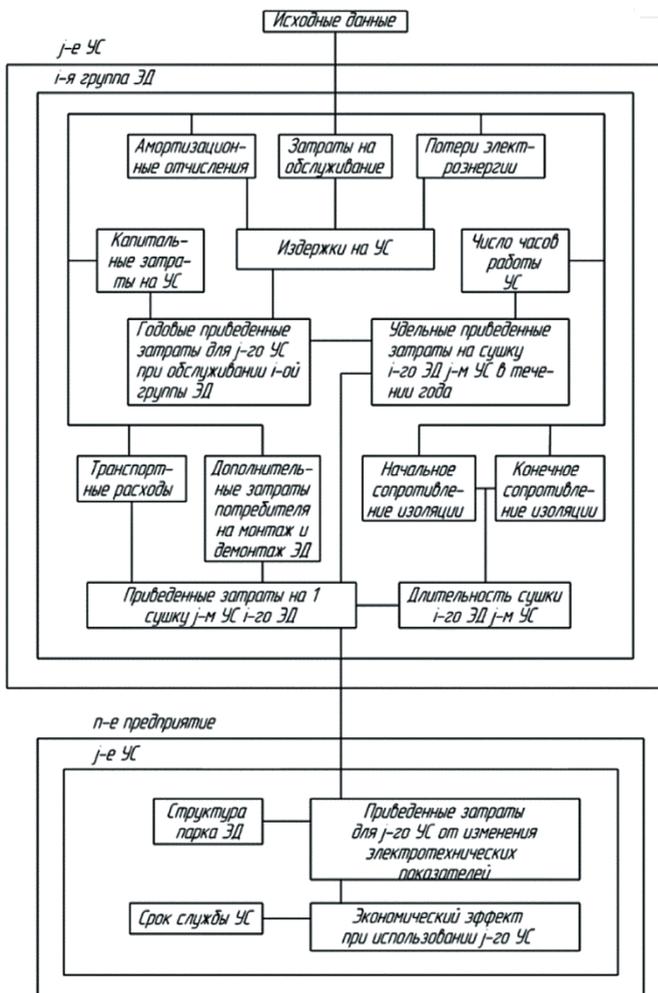


Рис. 2. Алгоритм расчета экономического эффекта от изменения электротехнических показателей при использовании устройств сушки

Во втором блоке по известным значениям затрат на одну сушку i -го ЭД и структуре парка ЭД рассматривается экономический эффект от использования j -го УС на n -м сельскохозяйственном предприятии за счет изменения электротехнических показателей.

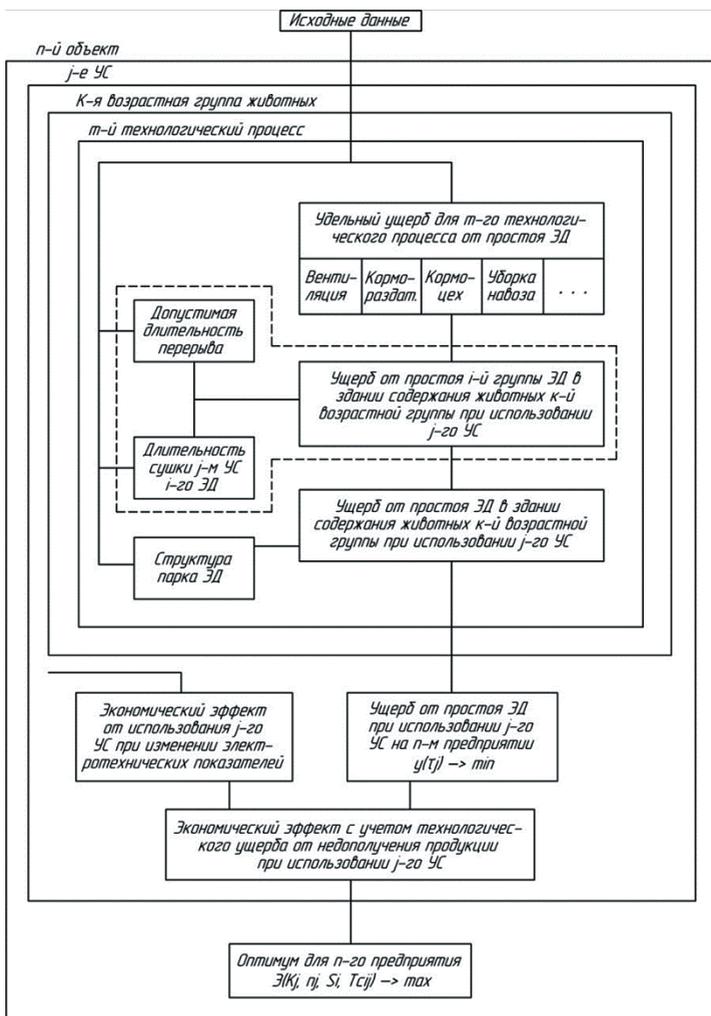


Рис. 3. Алгоритм расчета экономического эффекта при внедрении устройств сушки с учетом технологического ущерба

В третьем блоке проводится анализ влияния простоя i -го ЭД при сушке j -м УС на технологические процессы сельскохозяйственного производства и определяется экономический эффект с учетом технологического ущерба от недополучения продукции.

Использование приведенной математической модели позволяет рассчитать экономический эффект от применения различных УС для сельскохозяйственных предприятий разного профиля. Аналогичный подход к расчету экономического эффекта возможен для промышленных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система технических средств для производства работ при монтаже, пусконаладке, техническом обслуживании и ремонте машин и оборудования объектов АПК на 1991—2000 годы. Минск: ВНИИТИМЖ, 1989. 217 с.
2. Пястолов А.А. Эксплуатация и ремонт электроустановок. М.: Колос, 1984. 271 с.
3. Прищеп Л.Г. Проектирование комплексной электрификации. М.: Колос, 1983. 271 с.
4. Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю. Опыт эксплуатации устройств влагозащиты изоляции обмоток электрооборудования на предприятиях нефтегазового комплекса // Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России: 7-я всероссийская НТК. М.: Издательство РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007.
5. Немировский А.Е., Сергиевская И.Ю. Опыт эксплуатации устройств электроосмотической сушки изоляции обмоток электрооборудования на предприятиях нефтегазового комплекса // Актуальные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России: 7-я всероссийская НТК. М.: Издательство РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007.

М.Е. Малыш, MalyshMY@mpei.ru, НИУ «МЭИ», Москва

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ГРАФИКА НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ШТРАФНЫХ САНКЦИЙ И ЦЕНЫ НА МОЩНОСТЬ

Управление спросом — развивающийся в нашей стране компонент программ повышения энергетической эффективности. Целью управления спросом является суточное выравнивание объемов потребления электрической энергии посредством переноса электропотребления с часов пиковых нагрузок работы электроэнергетических систем на ночные часы либо на периоды выходных и праздничных дней [1]. Для участия в управлении спросом необходимо предоставить планируемые графики нагрузки с учетом уменьшения потребления электроэнергии в часы, в которые планируется проводить управление спросом.

На примере крупного потребителя рассмотрим алгоритм планирования суточного графика нагрузки и оценим влияние штрафных санкций и цены на мощность на общую плату за электроэнергию. Алгоритм создания графика базовой нагрузки с учетом штрафов и цены за мощность заключается в выборке данных, создании первичного графика прогноза по средним значениям и его корректировке по двум параметрам: по величине штрафных санкций и цене за мощность.

Для анализа и построения прогнозных графиков были выбраны почасовые графики нагрузки с сентября по декабрь.

Алгоритм создания базового графика нагрузки по средним значениям. Для создания графика базовой нагрузки необходимо выполнить следующие операции.

1. Выбрать объем данных почасовых графиков нагрузки предприятия за необходимый для прогнозирования период (один или два месяца).

2. Создать таблицу в Excel, в которой в столбцах будут указаны часы, а в строках — даты потребления электроэнергии.

3. Разделить данные о потреблении нагрузки по дням недели: первый вариант — на две группы (будние дни и выходные), второй вариант — на три группы (понедельники и пятницы; вторники, среды и четверги; выходные дни). Если встречаются дни с нехарактерно высокой или низкой нагрузкой, значения нагрузки в эти дни необходимо исключить. Также для более точного разделения на группы может быть использован кластерный анализ методом *k*-средних по параметрам максимальной и средней мощности [2].

4. Расчет значений графика базовой нагрузки выполняется вычислением среднего арифметического значения нагрузки для каждого часа потребления электроэнергии.

5. Полученный в результате выполнения пп. 1—4 график базовой нагрузки может быть скорректирован с учетом фактически складывающихся условий в день события управления спросом.

Корректировки в график базовой нагрузки могут вноситься на основании информации о погоде или информации о потреблении в период, предшествующий разгрузке, в день события управления спросом. Существует заинтересованность в экономии не только за счет событий управления спросом, но и за счет почасовых цен штрафов за перебор потребления электроэнергии (превышения фактического почасового объема покупки электрической энергии над соответствующим плановым почасовым объемом) и за недобор потребления электроэнергии (превышения планового почасового объема покупки электрической энергии над соответствующим фактическим почасовым объемом). Поэтому в качестве фактора, влияющего на корректировку базового графика, выбраны почасовые цены штрафов за перебор и недобор потребления электроэнергии и цена на мощность.

Корректировка базового графика по ценам почасовых штрафов за перебор и недобор потребления электроэнергии. Для корректировки базового графика по ценам почасовых штрафов были проанализированы данные по ставкам штрафов за перебор и недобор по сравнению с прогнозом. Отдельно по ставкам за перебор и недобор в течение месяца были вычислены количество максимальных ставок в каждый час. Также были вычислены максимальные величины ставок за недобор и перебор.

Для примера на рисунке показаны графики, характеризующие количества максимальных значений ставок за перебор и недобор для октября.



Рисунок. Количество максимальных значений ставок за перебор и недобор

Максимальная величина штрафов может значительно различаться в течение месяца. При этом для любого месяца есть закономерности штрафов в течении дня:

- а) штрафы за перебор в основном присутствуют в утреннее время (5:00—10:00) и в конце рабочего дня (17:00—20:00);
- б) штрафы за недобор берутся в нерабочее и ночное время (21:00—04:00).

В некоторых случаях приведенные закономерности не соблюдаются, максимальные значения ставок могут изменяться в зависимости от ситуации в энергосистеме.

Чтобы учесть цены штрафов, необходимо полученные данные графика базовой нагрузки умножить на выбранные увеличивающие и уменьшающие коэффициенты (например: 0,9; 0,95; 1,05; 1,1). С помощью функции «ЕСЛИ» в Excel прописывается алгоритм выбора значения графика базовой нагрузки в соответствии с величиной штрафа за перебор или недобор потребления энергии (например, если штраф за перебор потребления энергии от 0 до 500 руб/ч, то в этот час выбирается график базовой нагрузки с коэффициентом 0,95).

Корректировка базового графика нагрузки по величине цены на мощность по 6-й ценовой категории. Для этого необходимо провести следующие действия:

1) на сайте администратора торговой системы (ОАО «АТС» [3]) найти отчетные часы пиковой нагрузки в месяц, для которого проводится прогноз нагрузки;

2) для часа пиковой нагрузки выбрать понижающий коэффициент в зависимости от того, на сколько предприятие может снизить потребление в данный час (например, 2, 3, 5 %);

3) по данным о ставке за электроэнергию предыдущего месяца для прогнозируемого дня вычислить наименьшую ставку за день, на который ведется прогноз;

4) перенести нагрузку с часа пиковой нагрузки на час, для которого ставка за электроэнергию наименьшая;

5) провести расчет стоимости электроэнергии и штрафов для скорректированных данных;

6) при неудовлетворительном результате корректировки изменить понижающий коэффициент и повторить пункты 3—5.

Проверка расчета графика нагрузки с учетом штрафных санкций и цены на мощность. Проверка проводится посредством вычисления общей стоимости за электроэнергию и величины штрафных санкций для пятой или шестой ценовой категории.

Стоимость электроэнергии рассчитывается по формуле

$$C_{\text{бик}} = C_{\text{бик(э)}} + P_{\text{max}} \Pi_{\text{max(день)}} + P_{\text{сеть}} \Pi_{\text{сеть(день)}},$$

где $C_{\text{бик(э)}}$ — стоимость составляющей по электроэнергии по 6-й ценовой категории за день, руб.; P_{max} — оплачиваемая величина мощности, кВт; $\Pi_{\text{max(день)}}$ — ставка за мощность, приобретаемую потребителем, руб/МВт [4]; $P_{\text{сеть}}$ — максимальное значение мощности входящих в интервал плановых часов пиковой нагрузки, МВт; $\Pi_{\text{сеть(день)}}$ — дифференцированная по уровням напряжения ставка тарифа на услуги по передаче электрической энергии за содержание электрических сетей предельного уровня нерегулируемых цен, руб/МВт за день [4].

Стоимость штрафов при этом составит:

$$\text{Ш}_{\text{день}} = \sum_i^N \Pi_{\text{превыш},i} \Delta P_{\text{превыш},i} + \sum_j^M \Pi_{\text{недобор},j} \Delta P_{\text{недобор},j},$$

где $C_{\text{превыш.}i}$ — ставка за превышение плана, руб/(МВт·ч); $C_{\text{недобор.}j}$ — ставка за недобор до плана, руб/(МВт·ч); $\Delta P_{\text{превыш.}i}$ — превышение потребления мощности относительно планового потребления, МВт·ч; $\Delta P_{\text{недобор.}j}$ — недобор потребления мощности до планового потребления, МВт·ч.

Проведение расчетов и результаты. Создание графиков прогноза проходило в несколько этапов.

Для создания прогнозных графиков по данным сентября для прогноза на октябрь почасовые графики были разделены на три группы по дням недели (понедельники и пятницы; вторники, среды и четверги; выходные дни). Для каждой группы данных были рассчитаны базовые графики для прогноза по средним значениям за каждый час.

Затем проводилась корректировка графика прогноза по величине штрафных санкций. Для этого используются данные о количестве максимальных значений ставок за перебор и недобор за каждый час, для месяца предшествующего тому, для которого ведется прогноз. Значения количества максимальных ставок за недобор и перебор сводятся в одну таблицу, причем значения количества максимальных ставок за недобор указываются в таблице со знаком минус.

Условия корректировки следующие: если значение количества максимальных ставок в выбранный час превышает 5, то значение графика прогноза умножается на 0,9; если значение количества максимальных ставок за недобор в выбранный час находится в диапазоне от 0 до 5, то значение графика прогноза умножается на 0,95; если значение количества максимальных ставок за перебор в выбранный час находится в диапазоне от 0 до 5, то значение графика прогноза умножается на 1,05; если значение количества максимальных ставок за перебор в выбранный час превышает 5, то значение графика прогноза умножается на 1,1.

Для проверки скорректированного графика для каждой группы выбирался наихудший случай — день, в который величина штрафа за недобор и перебор максимальны.

С использованием ранее описанного алгоритма получения прогнозного графика с учетом штрафов за один день можно сэкономить $3415 - 966 = 2449$ руб. по сравнению с прогнозным графиком без учета штрафов (расчет выполнялся для наихудшего случая, т.е. дня с наибольшими штрафами в октябре).

Затем проводилась корректировка графика прогноза по цене за мощность. Для часа пиковой нагрузки (18:00—19:00) был выбран понижающий коэффициент. По расчетам общей стоимости за электроэнергию экономия по скорректированному графику прогноза может составить до 5 %.

Выводы. По итогам проведенного исследования можно отметить, что метод планирования графика нагрузки с учетом штрафных санкций и цены на мощность может быть использован для получения выгоды при оплате электроэнергии. Выгода от корректировки графика прогноза по величине штрафных санкций невелика, поскольку штрафные санкции не оказывают существенного влияния на стоимость электроэнергии. Тем не менее даже при небольшой корректировке прогнозного графика общая величина штрафов может уменьшиться в два раза. Более пристальное внимание в дальнейших исследованиях стоит обратить на корректировку графика прогноза по величине платы за мощность, так как экономия в течение месяца может оказаться существенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дзюба А.П., Соловьева И.А. Исследование инструментов управления спросом на электропотребление в рамках оптового и розничного рынков электроэнергии России // Экономика, предпринимательство и право. 2016. Т. 6. № 2. С. 147—162.
2. Малыш М.Е. Использование методов кластеризации для анализа графиков нагрузки предприятия // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Р 154. Двадцать шестая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12—13 марта 2020 г., Москва): Тез. докл. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 594.
3. [Электронный ресурс] — <http://www.atsenergo.ru>
4. [Электронный ресурс] — <http://www.mosenergosbyt.ru>

*Н.Б.Молдырақымова, 29041998mn@mail.ru,
М.С. Жармагамбетова, zh_meruert.s@mail.ru, КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

При рассмотрении вопросов повышения энергетической эффективности электроснабжения подстанции необходимо помнить, что энергетическая эффективность — один из основных критериев любой экономической системы, которая обладает значительным эффектом: чем выше энергоэффективность в начальных этапах технологической цепочки, тем эффективнее вся система в совокупности.

В настоящее время в Республике Казахстан на энергетику приходится около 47 % общего потребления первичных энергетических ресурсов. При этом в сфере энергетики наблюдается высокая доля износа генерирующего и электросетевого оборудования, что в результате приводит к низкой эф-

фактивности генерации электроэнергии и сравнительно высокой величине потерь в электрических сетях.

Многие из эксплуатируемых региональными электросетевыми компаниями (РЭК) высоковольтных линий электропередачи построены более 40—50 лет назад и имеют протяженность, значительно превышающую проектную, а также изношенность более чем на 50—60 % основного электрооборудования, используемого для передачи и выработки электроэнергии, что отрицательно сказывается на уровне постоянных и переменных потерь.

Для распределительных сетей Казахстана характерен весьма значительный уровень потерь — около 13 %, при этом наибольшая доля потерь в РЭК приходится на распределительные сети с наименьшим напряжением (0,4 и 6—10 кВ), что составляет порядка 70 % суммарных потерь электроэнергии в РЭК [4] (рисунок).

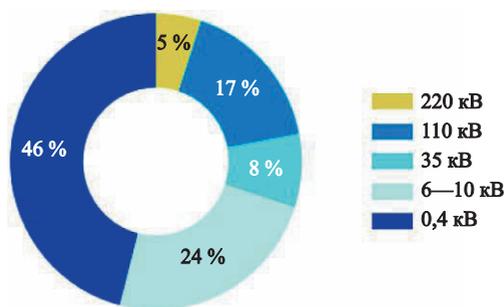


Рисунок. Структура потерь электроэнергии по уровням напряжений в РЭК

Здесь также необходимо отметить, что эксплуатация трансформаторных мощностей РЭК не всегда эффективна, загрузка некоторых трансформаторов во многих компаниях даже в зимний период достигает максимум 15—20 %. Необходимо отметить также, что в энергокомпаниях Казахстана уделяют недостаточно внимания вопросам проведения мероприятий по снижению потерь (компенсации реактивной мощности, оптимизации режимов и др.) и внедрения современных программных комплексов по расчету потерь электроэнергии.

В планах мероприятий по энергосбережению, разработанных по результатам проведенных в соответствии с законом РК «Об энергосбережении...» энергетических обследований, практически отсутствует кропотливая работа по анализу технологической эффективности предприятий передачи, распределения и потребления электрической энергии [3].

Так, в 2020 г. в электрических сетях АО «КЕГОС» произошло 248 аварийных отключений (что на 17 % больше показателя 2019 г.), также зафикси-

ровано и расследовано 48 технологических нарушений, из них: 1 авария, 2 отказа I степени и 45 отказов II степени (этот показатель вырос на 14 %) [5].

В 2020 г. на линиях электропередачи произошло 34 технологических нарушения, 15 из них с повреждением элементов воздушных линий. На подстанциях в минувшем году произошло 14 технологических нарушений, из них 6 с повреждением основного оборудования.

На основе приведенного анализа необходимо отметить, что вопросы повышения энергетической эффективности и надежности работы системы требуют грамотных технических решений, реализации проектов и мероприятий в этом направлении.

В настоящее время начаты два крупных проекта в целях трансформации и повышения энергетической эффективности системы [5].

1. Проект «Внедрение ЦСПА и АРЧМ». Проект включен в Государственную программу «Цифровой Казахстан» и имеет синергетический эффект — реализуется совместно с отечественными электростанциями. Системы являются элементами и основой для построения будущей интеллектуальной цифровой энергосистемы Казахстана. Централизованная система противоаварийной автоматики (ЦСПА) обеспечивает в автоматическом режиме устойчивость энергосистемы при возникновении в ней нарушений нормального режима работы. Система автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ) обеспечивает автоматическое поддержание баланса генерации-потребления электрической энергии в энергосистеме. Цели проекта: повысить энергоэффективность управления режимами объединенной энергосистемы страны, а также надежность работы системы.

2. Проект «Внедрение системы мониторинга и управления на основе синхrofазорных технологий WAMS/WACS». Проект также вошел в госпрограмму «Цифровой Казахстан». Система мониторинга и управления на основе синхrofазорных технологий WAMS/ WACS позволяет максимально использовать пропускную способность сети за счет управления в режиме реального времени. Цели проекта: мониторинг энергосистемы в режиме реального времени и управление пропускной способностью линий электропередач за счет разработки соответствующих алгоритмов и создания новой адаптивной системы управления электроэнергетической сети по текущим параметрам состояния системы с синхронизацией по времени.

Также при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении систем электроснабжения необходимо применять новое энергоберегающее оборудование и технологии [1, 2]:

— трансформаторы, заполненные герметичным масляным или жидким негорючим диэлектриком с уменьшенными удельными техническими потерями электрической энергии и массогабаритными параметрами;

- силовые трансформаторы со схемой включения обмоток Δ/Y с нулем или звезда—зигзаг с нулем;
- трансформаторы с симметричными устройствами;
- сухие трансформаторы для ТП и малогабаритных ТП, встроенные в здание;
- элегазовые выключатели напряжением 35 кВ и выше (в том числе с установкой трансформаторов тока);
- выключатели с электроприводами основных и заземляющих ножей напряжением 35 кВ и выше;
- выключатели горизонтально-поворотного типа с одним разъемом к полюсу; с опорными стержневыми изоляторами (фарфоровые или полимерные улучшенного качества);
- вакуумные выключатели напряжением 6—20 кВ;
- вакуумные выключатели нагрузки наружной установки напряжением 6—20 кВ;
- выключатели внешнего исполнения на токи до 250 А для секционирования ВЛ напряжением 0,38 кВ;
- малогабаритные комплектные распределительные устройства 6—20 кВ с элегазовой или жесткой изоляцией с выключателем нагрузки для нескольких соединений;
- управляемые конденсаторные установки, подключаемые к шинам 0,4 кВ;
- новые провода и электротехнические материалы;
- перевод линий электропередачи и подстанций на более высокое номинальное напряжение;
- использование в качестве ВЛ 0,4 кВ самоходных изолированных проводов, кабельных линий 6—20 кВ из сшитого полиэтилена;
- широкое внедрение системы диагностики состояния электрооборудования.

Вопросы энергосбережения, повышения энергоэффективности являются важными элементами в структуре распределения электроэнергии. Снижение потерь при транспортировке электрической энергии, соблюдение энергоэкономических технологических режимов работы, замена электрооборудования являются приоритетными задачами, направленными как на снижение потерь электрической энергии, так и на повышение энергетической эффективности системы электроснабжения в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гапанович В.А.** Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник. М.: Издательский дом МИСиС, 2012. 619 с.

2. **Жармагамбетова М.С., Шураханова С.Е.** Энергосбережение и повышение энергоэффективности — ключи для решения проблем в электроэнергетике // Фёдоровские чтения — 2020: Тр. 50-й межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2020.
3. **Кангожин Б.Р., Жармагамбетова М.С., Даутов С.С.,** Энергосбережение и энергосберегающие методы, технологии, оборудование // Фёдоровские чтения — 2019: Тр. 49-й межд. научно-практ. конф. М.: Издательский дом МЭИ, 2019.
4. **Обзор** государственной политики Республики Казахстан в области энергосбережения и повышения энергоэффективности. 2014.
5. **Годовой отчет** АО «КЕГОС». 2020.

*А.Р. Денисова, denisova_ar@mail.ru, ФГБОУ ВО «КГЭУ»,
Э.Г. Сибгатуллин, elmas@pkledus.ru, ПК LEDUS, г. Казань,
Н.А. Савин, KOLAY_AK@mail.ru*

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

Во многих производственных организациях и учреждениях существенное электропотребление приходится на системы искусственного освещения. Поэтому внедрение современных энергосберегающих технологий в эти системы имеет большое значение.

Согласно постановлению Правительства РФ № 1312 от 03.11.2018 г. с 1 января 2020 г. начался второй этап действия требований к осветительным устройствам и электрическим лампам. На этом этапе значительно повышаются требования к световой отдаче ламп (лм/Вт — характеристика энергоэффективности) для общественных и производственных помещений. Кроме того, пускорегулирующая аппаратура люминесцентных или индукционных ламп с этого времени должна иметь функцию регулирования светового потока, а уровень потерь активной мощности в пускорегулирующей аппаратуре не должен превышать 8 %. Возрастают требования к энергетической эффективности по минимальному значению световой отдачи, индексу цветопередачи ($Ra \geq 80$), коэффициенту мощности ($\cos\varphi \geq 0,9$), минимальному коэффициенту пульсации светового потока. Выполнить такие требования имеющимися системами освещения зачастую невозможно. Это влечет за собой необходимость реконструкции систем освещения общественных и производственных помещений с использованием регулируемых светодиодных светильников. Светодиодные светильники позволяют перейти на новый уровень автоматизации и управления осветительными системами и выдерживать действующие требования по всем параметрам [1].

Существующие проблемы. По существующим требованиям СанПиН к факторам световой среды в помещениях различного назначения установлены

минимальные уровни естественного освещения, определяемые КЕО. И это правильно — ведь солнечный свет имеет наиболее безопасные биохарактеристики для живых организмов и растений, поэтому использование комбинированного (естественного и искусственного) освещения производственных и общественных помещений является предпочтительным [2]. Однако даже в дневное время, когда естественный свет в большом количестве поступает в помещения, этого бывает недостаточно для удаленных от окон зон, поэтому на протяжении всего рабочего времени включают лампы искусственного света. В результате имеется избыточное неравномерное освещение помещений, повышенная блеклость и яркость на рабочих поверхностях, низкий уровень зрительного комфорта. Качество освещения влияет на утомляемость, психологическое состояние и работоспособность сотрудников. Постоянная работа системы освещения в течение всего рабочего времени влечет высокое энергопотребление и необоснованные финансовые расходы.

Качественное освещение рабочего пространства должно отвечать следующим требованиям: достаточная освещенность; минимальная пульсация или ее отсутствие; равномерность освещения без участков с низким уровнем освещенности в отдельных зонах, резкими тенями; отсутствие источников высокой яркости со слепящим эффектом.

Предлагаемое решение. Регулируя интенсивность искусственного света с помощью системы автоматического регулирования светового потока ADL-System, встроенной в каждый светильник, можно добиться комфортного пребывания сотрудников и одновременно — значительной экономии электроэнергии.

Система автоматического регулирования светового потока ADL-System включает в себя ряд устройств [3, 4], подключенных к светильнику с возможностью регулирования (светодиодный светильник), которые автоматически поддерживают освещенность на рабочей поверхности на нормируемом уровне, уменьшая или повышая его световой поток. Изменение интенсивности светового излучения происходит в зависимости от естественной освещенности помещения. Технология обеспечивает значительный зрительный комфорт находящимся в здании людям.

Принцип работы базируется на функции автодиммирования. Для работы в автоматическом режиме в стандартную схему каждого светодиодного светильника добавляется контроллер и оптический фотодатчик. Оптический фотодатчик направлен на рабочую поверхность под светильником, чтобы максимально точно измерять величину освещенности.

Основу нашей разработки составляет программа, функционирующая по определенному алгоритму и реализующая задуманный сценарий. Программа регулирует мощность светильника в зависимости от интенсивности естественного света, проникающего в помещение. Она уменьшает световой по-

ток светильника на такую же относительную величину, и освещенность под светильником остается в пределах нормы (рис. 1). Разработанная программа управления системы ADL-System ведет расчеты в относительных величинах и является самообучаемой, поэтому она не требует калибровки и дальнейшей проверки. Мы закладываем в программу периодическое измерение освещенности на рабочей поверхности и плавной подстройки светильника. В течение всего срока службы система будет поддерживать нормируемый уровень освещенности несмотря на деградацию светодиодов и ухудшение свойств рассеивателя светильника.

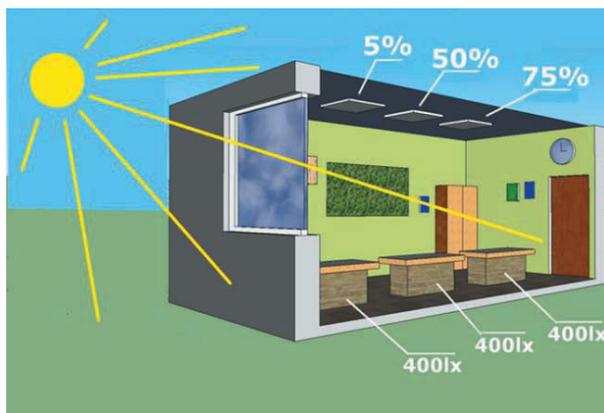


Рис. 1. Автоматическое регулирование интенсивности светового потока светильников в помещении с помощью ADL-System

Считаем большим достижением то, что изменение светового потока светильника происходит плавно, без скачков и незаметно человеческому глазу. Для этого путем большой экспериментальной работы были подобраны различные режимы управления контролера в начале и в середине цикла включения. Блок-схему автоматического регулирования светового потока светильника мы приводим в работе [4].

В солнечные дни, когда уровень естественного света, проникающего в помещения, очень высок и освещенность на рабочем месте достигает нормируемой величины, дополнительный искусственный свет уже не требуется и система переводит светильник в «спящий режим». В этом режиме потребляемая мощность светильника падает в среднем в 6 раз от номинального значения.

Преимуществом системы ADL-System является то, что она не требует дополнительных настроек при монтаже светильников и обслуживания

в процессе эксплуатации. Увеличивается ресурс светильника за счет работы в «щадящем» режиме. Сотрудникам нет необходимости в течение рабочего дня включать и выключать светильники, думать об экономии и комфорте.

Совместно с регулированием светового потока каждого светильника мы предлагаем использовать систему учета присутствия людей в помещении. Данная система отключает освещение при отсутствии людей.

Описание основного оборудования и технологического процесса системы. Система автоматического регулирования светового потока включает в себя (рис. 2):

- два датчика (на входе в помещение и на выходе из помещения);
- светодиодные светильники с возможностью регулирования;
- фоторелейный датчик, устанавливаемый на каждый светильник;
- программно-логистический контроллер, устанавливаемый на каждый светильник.

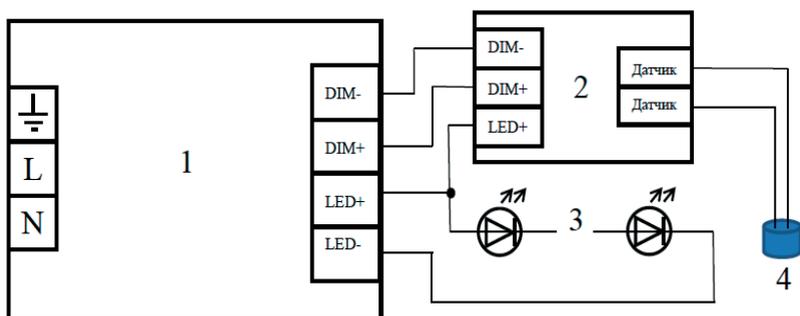


Рис. 2. Схема подключения системы автоматического регулирования светового потока ADL-System к источнику питания светодиодного светильника: 1 — источник питания светодиодного источника света; 2 — модуль автоматического регулирования; 3 — светодиоды; 4 — оптический датчик

Система автоматического регулирования ADL-System уменьшает световой поток светильника при определенном уровне естественного света из окна, снижая потребление мощности из сети. Основу системы составляет контроллер, который запрограммирован на определенный алгоритм действий при различном входящем сигнале от фотодатчика и сигналов от датчиков, установленных на входе или выходе из помещения. Именно контроллер выдает команду на необходимую интенсивность выдаваемого светового потока каждого светильника.

Изначально светильник включается на 100 % своей мощности. Фотодатчик под каждым светильником подает сигнал на контроллер о том, что на

рабочей поверхности изменилась освещенность, а тот, в свою очередь, изменяет световой поток лампы, подстраиваясь под заданную освещенность. При срабатывании на входе датчика движения человека подается сигнал на ключ, который подает электроэнергию на светильники, загораются все лампы на 100 % [5]. Подробнее алгоритм системы описан в работах [6, 7].

Подтверждение эффективности системы.

Для проведения необходимых настроек, испытаний, а также определения уровня энергоэффективности данной системы на базе Казанского государственного энергетического университета была оборудована экспериментальная лаборатория (рис. 3).

В течение года проводилась апробация системы ADL-System. В результате экспериментальных исследований мы добились максимальной адекватности системы и полного выполнения заданных функций.

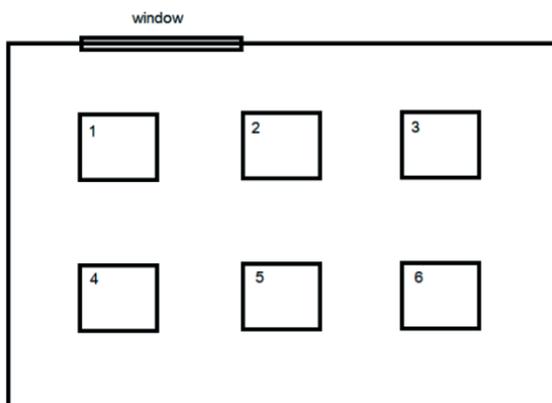


Рис. 3. План расположения светильников 1—6 в исследуемом помещении

Проводились расчеты экономической эффективности и сроков окупаемости при внедрении системы ADL-System. В результате для исследуемого помещения было получено снижение интенсивности светового потока светильников первого ряда (ближе к окну) на 83 %, второго ряда на 65 % и третьего ряда на 5 %. Данное исследование проводилось в зимнее время года, когда интенсивность светового потока естественного освещения через окна не столь велико, как весной или летом. Но и получившиеся результаты впечатляют. Экономия электроэнергии за счет регулирования светового потока исследуемой группы светильников составила 51 %, а срок окупаемости — менее года. Безусловно, экономия электроэнергии должна рассчитываться для каждого помещения индивидуально.

Логика системы АСУ при присутствии людей. Для управления системой освещения в целом нами предлагается использовать систему автоматизации включения/отключения при присутствии или отсутствии людей в помещении. Данная система способна вести подсчет вошедших и вышедших людей.

Основу системы составляет контроллер, который запрограммирован на определенный алгоритм действий при различном входном сигнале от объемных датчиков, установленных на входе или выходе из помещения. Программирование контроллера осуществлено в среде Codesys 2.3, были использованы языки программирования стандарта МЭК 61131-3 (CFC и ST). При отключении всех светильников после того, как в помещении не останется ни одного человека, необходима задержка отключения в течение 5 секунд. Это достигается путем подачи на RS-триггер (SET, RESET) сигнала от таймера TON. В данной работе RS-триггер используется в качестве ключа подачи электроэнергии на светильники после срабатывания датчиков движения.

Датчики движения — лазерные датчики, считывающие изменения объема в пространстве и вырабатывающие сигнал, если таковое произошло. Для данной системы необходимо два таких датчика: на входе в дверь (устанавливается в коридоре) и внутри помещения (устанавливается в аудитории).

Фрагмент работы системы, полученный в результате моделирования в программе CoDeSys, представлен на рис. 4.

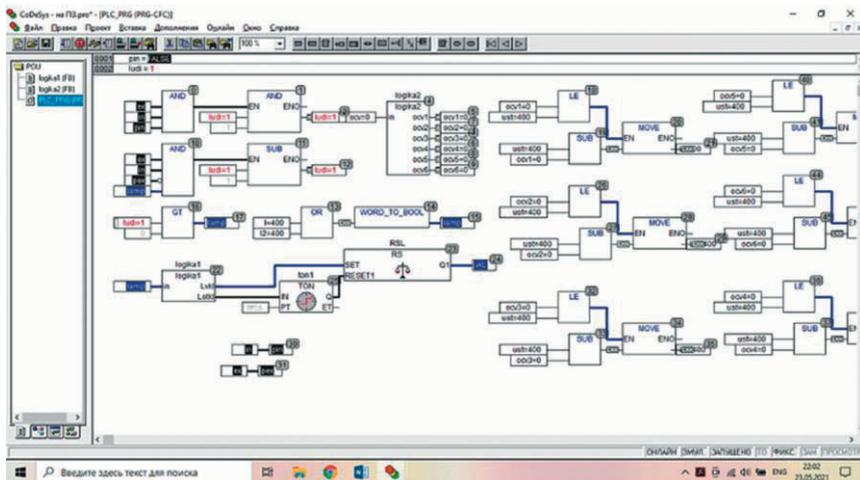
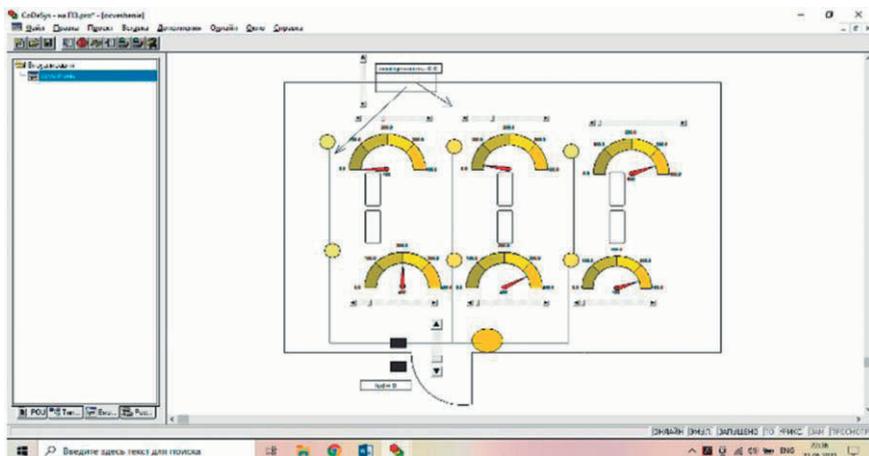


Рис. 4. Работа системы в программе CoDeSys

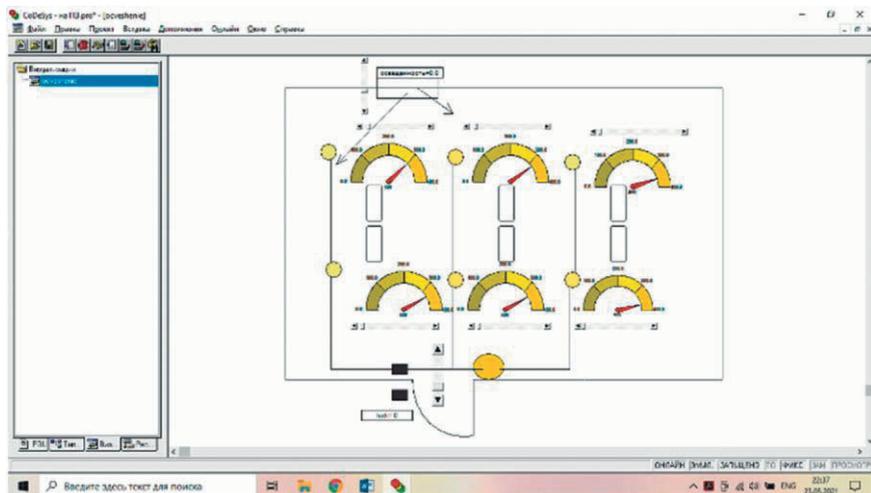
Считаем, что внутренний датчик подключен к первому входу контроллера. Его состояние будет задавать переменная *ex*. Внешний датчик подключен ко второму входу контроллера. Его состояние задает переменная *in*. Первым выходом будем управлять переменной лампы, которая подает сигнал на RS-триггер.

Обязательным условием работы программы является изменение на единицу счетчика количества людей в аудитории. Логика работы датчиков движения: когда человек входит в помещение, то сначала срабатывает датчик в коридоре, затем внутри помещения, когда вошедший откроет дверь. В этом случае в контроллере происходит операция +1 и идет сигнал на ключ (RS-триггер), зажигаются все светильники. Если человек выходит из помещения, то сначала срабатывает датчик внутри помещения, затем датчик в коридоре, когда вышедший закрывает дверь. В этом случае в контроллере происходит операция -1 и через таймер TON идет сигнал на ключ (RS-триггер). Спустя 5 с отключаются все светильники.

Переменная *ludi* будет принимать значение, равное числу людей, находящихся в данный момент времени в комнате, переменная *rip* будет отражать значение переменной *in* (состояние внешнего датчика) на предыдущем цикле программы, *rex* — отражать значение переменной *ex* (состояние внутреннего датчика) на предыдущем цикле программы.



a)



б)

Рис. 5. Визуализация работы системы, когда в помещении присутствуют люди: а — освещенность от окна 1000 лк; б — освещенность от окна 300 лк

Для более наглядного представления результатов регулирования световым потоком светодиодных светильников на рис. 5 представлены визуализации работы системы при наличии людей и различной естественной освещенности от окна.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванова В.Р., Садыков М.Ф.** Патент на полезную модель «Интеллектуальный блок питания светильника» № 142028, Заявка № 2014103803 от 04.02.2014 г. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «КГЭУ».
2. **Денисова А.Р., Роженцова Н.В.** Энергосбережение в промышленных и коммунальных предприятиях: учебное пособие // Казань: Казанский гос. энергетический ун-т, 2010. 247 с.
3. **Денисова А.Р., Сибгатуллин Э.Г.** Повышение энергоэффективности при использовании системы автоматического регулирования светового потока // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1(58). С. 38—39.
4. **Денисова А.Р., Савин Н.А.** Энергоэффективная система автоматического регулирования светового потока светодиодных светильников // Федоровские чтения — 2020: 50-я международная научно-практическая конференция. Москва: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 121—126.
5. **Денисова А.Р., Сидоров А.Е., Закирова З.Р.** Перспектива модернизации системы освещения в промышленных отраслях с применением светодиодных источ-

- ников света // Фёдоровские чтения — 2020: 50-я международная научно-практическая конференция. Москва: Издательский дом МЭИ, 2020. С. 151—156.
6. **Рудаков А.И., Роженцова Н.В., Денисова А.Р.** Современные технические средства повышения энергоэффективности водокольцевых машин // Промышленная энергетика. 2014. № 5. С. 27—30.
 7. **Ivanova V.R., Ivanov A.S., Fetisov L.V.** The development of an automated station for group soldering of the led lines // 2018 14th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) — 44894 proceedings. P. 336—338.

*А.А. Баширов bu-bu-bu-bu@mail.ru,
Л.О. Казмирук lev.kazmiruki@mail.ru,
В.Д. Садаков Vitalysandakov@gmail.com,
КГЭУ, г. Казань*

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ НА РАСТЕНИЯ

Постепенно развиваясь в процессе эволюции, растения научились реагировать на условия окружающей среды и подстраиваться под нее. Наиболее характерными изменениями, связанными с внешними факторами, являются изменение биомассы растения; изменение сроков созревания и цветения; цвет листьев и цветков; длина и толщина стебля и другие.

Одним из важнейших факторов развития растения является свет. В отсутствие света растение не может нормально развиваться, однако и переизбыток света не сказывается положительно. Кроме того, при прочих равных условиях, в зависимости от характеристик получаемого света, растения могут развиваться совершенно по-разному. Самыми значимыми параметрами источника света, влияющими на рост растения, являются длина волны и интенсивность света.

Исходя из этого, очевидно, что для человека будет отличным вариантом использовать свет в качестве регулятора развития растения. Для одних растений подбирают свет для набора биомассы, для декоративных растений свет желательно настраивать на увеличение продолжительности цветения. Однако стоит помнить, что несмотря на наличие общих рекомендационных данных, построенных по принципу «необходимое качество — изменяемая характеристика», они не могут быть одинаково эффективны для разных видов растений. Поэтому в зависимости от того, какое растение перед нами, следует использовать оптимальные характеристики именно для этого вида растения во избежание достижения результата, не соответствующего ожидаемому.

Для каждого вида растений набор необходимых характеристик света для достижения одних и тех же целей может отличаться, и потребуются объемные исследования для установления оптимальных значений. Для создания справочного материала по каждому виду растения также потребуются долгие и кропотливые исследования. В предлагаемой методике описан способ исследования двух быстрорастущих салатных культур в различных условиях освещенности.

Исследования следует проводить в двух категориях:

- при досвечивании (обеспечении растения солнечным светом и добавлении к нему узконаправленных спектров;
- при одном источнике света — освещении в отсутствие солнечного света.

Данная методика направлена на нахождение оптимального спектра света для взращивания определенных культур. Второй же интересующей частью исследования является частота ШИМ-модуляции источника светодиодного света, а именно, как влияет ее увеличение или уменьшение на растение. Полученные данные можно экстраполировать (с определенной точностью) на схожие растения, например быстрорастущие салаты, и использовать непосредственно как рекомендацию по освещению исследуемых культур.

Выбраны следующие цвета и сочетания цветов для использования в исследовании:

- красный;
- синий;
- белый (только в условиях одного источника света);
- красный и синий в соотношении 1:1;
- красный и синий в соотношении 2:1;
- красный и синий в соотношении 4:1.

В условиях одного источника света для полноценной компенсации энергии, получаемой от солнца, цветные светодиоды будут дополняться белыми светодиодами. Результатом этой части исследования будет являться группа зависимостей «параметр растения — характеристика света». Например: наилучшим спектром света для получения растения с самой большой биомассой в условиях досвечивания является сочетание красного и синего в сочетании 2:1.

Завершающим этапом является выяснение зависимости частоты ШИМ-модуляции источника света, проведенное для двух наиболее эффективных спектров по результатам предыдущего этапа. Для исследования выбраны стандартные частоты 976 и 488 Гц. В итоге будет получен ответ, как влияют частоты ШИМ-модуляции на растения.